

АНТРОПОГЕННОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА РАСТИТЕЛЬНЫЕ РЕСУРСЫ

МОНИТОРИНГ СОСТОЯНИЯ *PINUS SYLVESTRIS* (PINACEAE) В СОСНЯКАХ ЛИШАЙНИКОВЫХ ПРИ ЗАГРЯЗНЕНИИ ВЫБРОСАМИ СЫКТЫВКАРСКОГО ЛЕСОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА (РЕСПУБЛИКА КОМИ)

© 2022 г. Е. А. Робакидзе¹, *, К. С. Бобкова¹

¹Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук,
г. Сыктывкар, Россия

*e-mail: robakidze@ib.komisc.ru

Поступила в редакцию 29.03.2022 г.

После доработки 11.05.2022 г.

Принята к публикации 15.09.2022 г.

Изложены результаты исследований (1998–2019 гг.) влияния аэротехногенных выбросов целлюлозно-бумажного производства АО “Монди Сыктывкарский лесопромышленный комплекс” (“Монди СЛПК”), функционирующего с 1969 г., на жизненное состояние древостоев и подроста в сосняках лишайниковых, расположенных на разном расстоянии от источника эмиссии. В начале исследования основные древостои в районе аэротехногенного загрязнения были охарактеризованы как слабо- и среднеповрежденные. С 1998 по 2019 гг. выявлено улучшение жизненного состояния древостоев, растущих как в зоне воздействия выбросов целлюлозно-бумажного производства, так и на фоновой территории. В 2005 г. сосняки лишайниковые, произрастающие в зоне воздействия выбросов, характеризовались как слабоповрежденные, в период с 2010 по 2019 гг. — как здоровые. Индексы поврежденности древостоев в импактной зоне в 2019 г. по сравнению с 1998 г. в среднем уменьшились в 3.2 раза и имели значения в диапазоне от 0.37 до 0.50. В зоне влияния выбросов сосняки лишайниковые характеризуются ослабленным лесовозобновительным процессом. Подрост представлен преимущественно сосной обыкновенной, мелкий подрост отсутствует. В импактной зоне подрост сосны характеризуется как ослабленный, в фоновых условиях — как здоровый.

Ключевые слова: мониторинг, аэротехногенное загрязнение, сосняки лишайниковые, дефолиация, дехромация, виталитетная структура древостоев, индексы поврежденности, состояние возобновления

DOI: 10.31857/S0033994622040094

Изучение динамики развития лесных сообществ в условиях воздействия атмосферных выбросов и оценка реакции растений на изменение уровня загрязнения является одной из важных проблем экологии. В настоящее время этот аспект исследований в России приобрел особую актуальность в связи с существенным изменением объема аэротехногенных выбросов загрязняющих веществ [1–3]. Сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.) занимает одну из ведущих позиций в формировании лесных массивов на Европейском Северо-Востоке России. Способность создавать значительную биомассу в условиях, непригодных для других видов древесных растений, является свидетельством ее больших адаптивных способностей [4].

Большое значение при проведении мониторинга состояния лесов и индикации качества окружающей природной среды имеет распределение де-

ревьев по классам повреждения — экологическая структура насаждения [1]. Согласно А.В. Яблокову [5], экологическая структура популяции — это расчленение древостоя на пространственно обособленные группы деревьев, находящиеся в специфических взаимосвязях с биотическими и абиотическими факторами среды. При антропогенном загрязнении популяция распадается на группировки особей, находящихся в различном состоянии жизнедеятельности [6].

В последнее время оценка состояния древостоев основывается на концепции виталитетной структуры, характеризующей соотношение в их составе особей, имеющих разное жизненное состояние (виталитет). Распределение особей по категориям состояния получило название виталитетного спектра. Эта концепция реализована в работе В.Т. Ярмишко с соавторами [7], посвященной сосновым лесам Кольского полуостро-

ва. Использование этого подхода и соответствующих методов анализа позволяет давать оценку и проводить сравнение состояния древостоев на определенной территории. Анализ виталитетных спектров древесного яруса лесных фитоценозов выявляет не только естественные процессы их развития и самоподдержания, но и воздействие стрессовых факторов, в том числе аэротехногенного загрязнения [3].

Важным показателем устойчивого развития лесных фитоценозов является характер естественного лесовозобновления. Количество и жизненное состояние подростка под пологом древостоев служит индикатором экологических и фитотенотических условий. Известно, что подрост хвойных древесных растений, развивающийся под пологом спелого древостоя, представляет собой часть естественного возобновительного фонда [8]. Подрост лесных насаждений характеризуется большим разнообразием и может классифицироваться по целому комплексу признаков (происхождению, возрасту, высоте, жизнеспособности). Состояние подростка характеризует способность лесного сообщества к самовосстановлению и непрерывному развитию. Молодые деревца, находящиеся в стадии интенсивного роста, остро реагируют на изменение водного и питательного режима, активно вовлекают в обмен веществ химические соединения, находящиеся в окружающей среде даже недолгое время.

АО “Монди Сыктывкарский лесопромышленный комплекс” (“Монди СЛПК”) является крупнейшим предприятием целлюлозно-бумажного производства в Европейской части России. СЛПК функционирует с 1969 г., среди его атмосферных выбросов сероорганические соединения, оксиды серы, азота, углерода, щелочная пыль. По данным публичных экологических отчетов предприятия, суммарное количество выбросов в 1998 г. составило 31 тыс. т, в 2006 – 20 тыс. т, в 2010 – 17 тыс. т, в 2015 – 10 тыс. т, в 2020 – 7.8 тыс. т [9]. Загрязнение среды этими выбросами оказывает существенное влияние на лесные экосистемы [10].

Для определения состояния лесов широкое распространение получил разработанный IUFRO метод мониторинга лесов на региональном и локальном уровнях в процессе выполнения программы ICP-Forests [11, 12]. Мониторинг состояния лесов успешно проводится и в странах Европы [13–15].

Цель данной работы – оценить динамику состояния деревьев и древостоев сосновых лесов лишайниковой группы типов в условиях длительного аэротехногенного воздействия целлюлозно-бумажного производства АО “Монди СЛПК” на территории Республики Коми.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования проводили в среднетаежных сосняках лишайниковых (*Pinetum cladinosum*), расположенных на разном расстоянии от источника эмиссии загрязняющих веществ АО “Монди СЛПК”. Постоянные пробные площади (ППП) были заложены в 1998–2000 годах. Сосняки на фоновой территории (ППП 28, 29, 30) расположены на расстоянии от 51 до 56 км от источника выбросов. Сосняки импактной территории (ППП 13, 14, 17) – на расстоянии от 7.3 до 11.2 км (табл. 1). Для исследованных лишайниковых фитоценозов, которые развиваются на борových террасах, на иллювиально-железистых подзолах, характерны разновозрастные древостои послерубочного и слепожарного происхождения. Древостои чистые по составу, сформированы сосной обыкновенной, имеют невысокую продуктивность. Краткая характеристика древостоев приведена в табл. 1. Подлесок отсутствует. Куртинно расположенный по площади подрост различной густоты состоит в основном из сосны обыкновенной.

Слабо развитый травяно-кустарничковый ярус представлен брусникой (*Vaccinium vitis-idaea* L.), толокнянкой обыкновенной (*Arctostaphylos uva-ursi* (L.) Spreng.), вереском обыкновенным (*Calluna vulgaris* (L.) Hill.) и осокой верещатниковой (*Carex ericetorum* Pall.). В мохово-лишайниковом покрове содоминируют лишайники *Cladonia rangiferina* (L.) Web., *C. stellaris* (Opiz) Brodo. и *C. sylvatica* (L.) Hoffm., пятнами встречаются мхи *Pleurozium schreberi* (Brid.) Mitt., *Polytrichum juniperinum* Hedw. и *P. commune* Hedw.

Выбор экспериментальных участков, расположенных в зоне воздействия выбросов АО “Монди СЛПК” и в фоновом районе для проведения исследований, предусматривал их сопоставимость по основным лесоводственно-таксационным характеристикам и лесорастительным условиям. Характеристика древостоев проведена согласно методам лесной таксации [16, 17]. Обработку материалов выполнили по [18]. Жизненное состояние деревьев сосны в древостоях определено согласно “Руководству...” [11, 12]. Каждое дерево в древостое характеризовалось совокупностью признаков, каждый из которых служит для оценки поврежденности. Наиболее информативны показатели состояния ассимиляционного аппарата. С помощью бинокля (“БПЦ 2 12 × 45М”, Россия) с расстояния, равного высоте дерева, у всех живых деревьев на ППП оценивали в баллах: степень дехромации, т.е. изменения цвета хвои, который является важным признаком и первым из визуальных индикаторов состояния дерева. Информативным признаком, характеризующим состояние дерева, является также степень дефо-

Таблица 1. Таксационная характеристика древостоев исследуемых сосновых лесов
Table 1. Mensurational characteristics of the studied tree stands in Scots pine forests

Номер ППП (расстояние от "Монди СЛПК", км) Sample plot number (distance from Mondi SLPK, km)	Состав древостоя Stand composition	Год наблюдений Year of observation	Возраст, лет Age, years	Число растущих деревьев, экз./га Number of growing trees, ind./ha	Средние Mean value			Общий запас, м ³ /га Total stock, m ³ /ha
					высота, м height, m	диаметр, см diameter, cm		
Сосновые леса в зоне действия выбросов АО "Монди СЛПК" Pine forests in the zone affected by Mondi SLPK emissions								
13 (7.3)	10С	2000	90–110	1180	16.9	16.2	200	
		2010	102–122	992	17.0	19.0	231	
		2019	111–131	912	17.0	20.0	229	
14 (11.0)	10С	1998	60–100	980	15.3	16.1	196	
		2010	72–122	992	19.0	19.0	258	
		2019	81–131	1054	19.0	20.0	284	
17 (11.2)	10С	1998	65–90	1530	16.0	14.7	206	
		2010	72–102	1500	17.2	17.0	237	
		2019	81–111	1175	19.0	20.0	273	
Сосновые леса фонового района Pine forests of in the reference area								
29 (51.0)	10С	1998	90–110	380	14.7	21.7	104	
		2010	102–122	464	14.3	20.0	138	
		2019	64–131	579	14.3	20.0	145	
30 (52.0)	10С	1998	80–120	1050	16.0	17.0	189	
		2010	92–132	987	16.0	20.0	216	
		2019	101–141	1120	16.0	20.0	257	
28 (56.0)	10С	1998	70–80	360	16.1	25.2	143	
		2010	82–92	417	18.0	26.2	241	
		2019	92–102	629	16.4	24.0	232	

лиации – изреживания – по сравнению с абсолютно здоровым деревом.

По степени дехромации хвои и дефолиации деревья распределяли на четыре класса, используя следующую шкалу: 0 – <10%, 1 – 11–25%, 2 – 26–60%, 3 – 61–99%, 4 – 100%. Кроме этого, учитывали долю сухих ветвей 1-го порядка в кроне по шкале: 0 < 10%, 1 – 11–25%, 2 – 26–50%, 3 – 51–99%. Состояние вершины, как наиболее важной части кроны дерева, оценивали отдельно по следующей шкале: 0 – живая, 1 – поврежденная, 2 – усыхающая и 3 – сухая. С учетом степени дефолиации, дехромации, наличия сухих сучьев в кроне и состояния вершины каждому дереву в исследуемых сосняках присваивался определенный класс повреждения:

0 класс – здоровое дерево, не имеет внешних признаков повреждения кроны и ствола, любые повреждения хвои <10% по отношению ко всей массе ассимиляционного аппарата, что не сказывается на состоянии дерева;

I класс – слабо поврежденное дерево (повреждение по одному или сумме всех признаков составляет 11–25%);

II класс – средне поврежденное дерево (26–60% повреждений);

III класс – сильно поврежденное (отмирающее) дерево (61–99% повреждений);

IV класс – отмершее дерево (100% повреждений).

Отмершие деревья обычно делятся на подклассы IVa (свежий сухостой) и IVб (старый сухостой): нет хвои, постепенно опадают ветви и кора). Согласно В.А. Алексееву [19], старый сухостой практически не влияет на поврежденность древостоя в целом, но при расчете необоснованно снижает индекс его жизненного состояния, поэтому мы при анализе жизненного состояния учитывали только свежий сухостой.

Для оценки жизненного состояния древостоев рассчитывали индекс их поврежденности по формуле средневзвешенного класса повреждения составляющих древостой деревьев, предложенной А.С. Алексеевым [1]. Индекс поврежденности является интегральным показателем состояния, на основании которого можно сравнивать разные по составу древостои. Для получения более точных результатов за основу расчета брали не число деревьев разных классов повреждения, а их стволовой запас древесины [19]:

$$I = \left(\sum_{i=0}^4 i w_i \right) / W,$$

где: I – индекс поврежденности древостоя, баллы; i – баллы (от 0 до 4) классов повреждения деревьев; w_i – стволовой запас древесины деревьев

i -го класса повреждения, м³/га; W – общий запас древостоя, м³/га.

С учетом величины индекса поврежденности древостои классифицировали по А.С. Алексееву [1] на следующие категории: здоровый древостой ($I = 0–0.5$), ослабленный древостой ($I = 0.6–1.5$), сильно ослабленный древостой ($I = 1.6–2.5$), отмирающий древостой ($I = 2.6–3.5$) и сухостой ($I = > 3.6$).

На ППП в 1998 и 2019 гг. проводили учет подраста сосны обыкновенной. К подросту относятся поколение древесных растений с возрастом от 2 лет и старше, а в условиях севера – старше 10 лет (ГОСТ 18486-87). В лесоводственной практике принято относить к подросту древесные растения высотой более 0.25 м и диаметром менее 6 см [20]. Учитывали общее количество растений подраста, их распределение по высоте и жизненное состояние. Классификацию состояния подраста проводили по категориям “благонадежный”, “неблагонадежный” и “сухой” [18].

Индекс жизненного состояния подраста определяли по формуле, предложенной В.А. Алексеевым [19]:

$$C = (100n_1 + 70n_2 + 30n_3) / N,$$

где C – индекс жизненного состояния подраста в момент наблюдения; n_1, n_2, n_3 – число здоровых (благонадежных), ослабленных (неблагонадежных) и усыхающих особей подраста на 1 га соответственно; N – общее количество подраста, включая сухостой. При величине индекса, равной 100–80% подрост считали здоровым, при 79–50% – ослабленным, при 49–20% – сильно ослабленным и при 19% и ниже – разрушенным.

Статистическую обработку данных проводили, используя пакет программ Microsoft Excel 2010 (лицензия Института биологии Коми НЦ УрО РАН). Указаны средние арифметические значения и их стандартные ошибки.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

За прошедшие 19 лет изменений в составе исследуемых древостоев не произошло. Запас древесины в сосняках лишайниковых увеличился как в зоне загрязнения, так и на фоновых участках (табл. 1).

Параметры состояния деревьев фонового района

Дехромация. В сосняках лишайниковых на фоновой территории доминируют (от 66 до 84%) здоровые деревья (рис. 1). Более высокие значения доли участия здоровых деревьев отмечены в начале исследования – в 1998 и 2000 гг. В интервале от 1998 до 2010 гг. число здоровых деревьев постепенно уменьшалось (1998 г. – $87 \pm 7.8\%$, 2005 г. – $73 \pm 6.5\%$, 2010 – 66 ± 5.9) и в дальней-

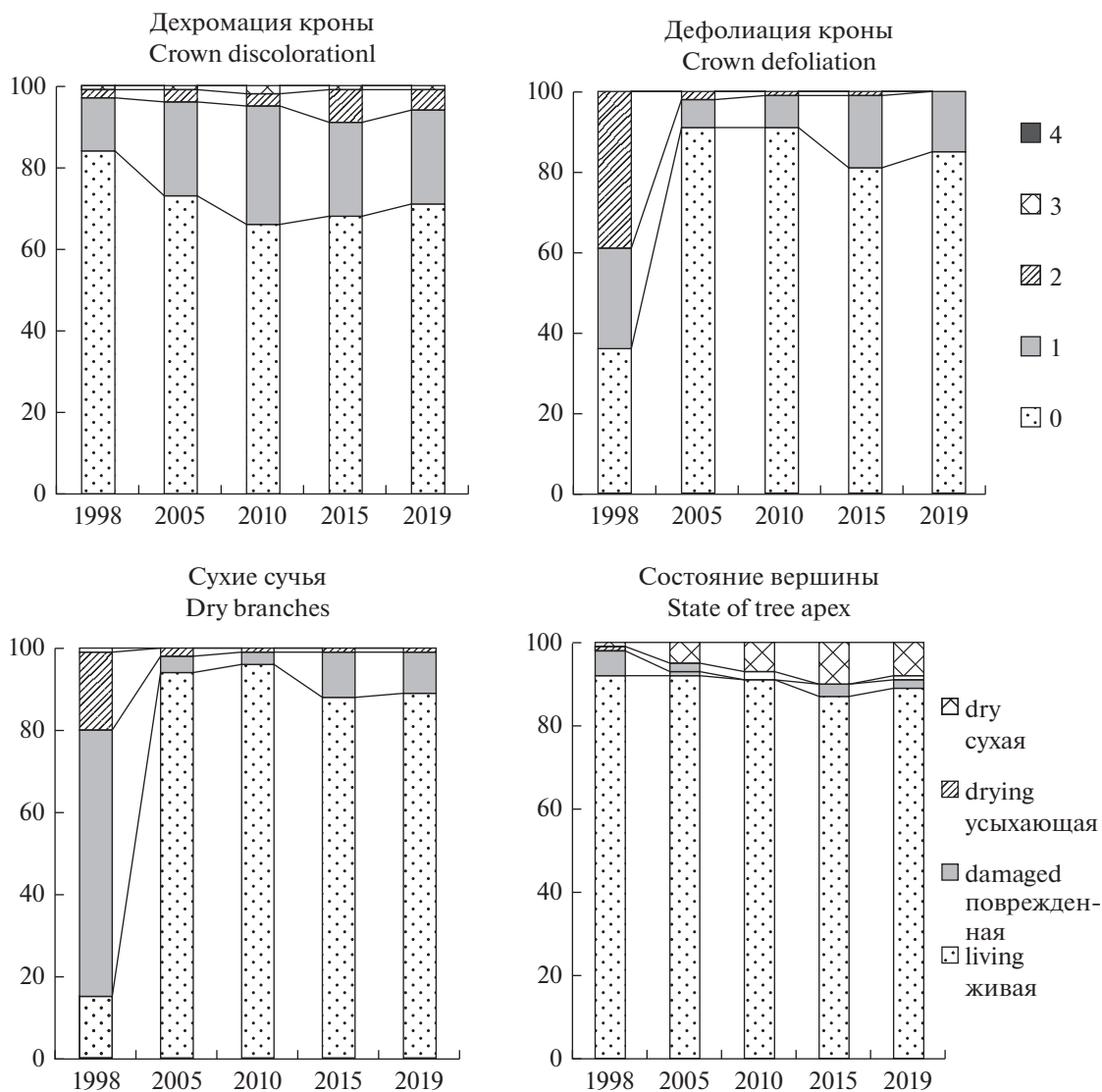


Рис. 1. Показатели состояния деревьев сосны обыкновенной в сосняках лишайниковых фоновых районов. Степень дехромации и дефолиации кроны, доля сухих ветвей: 0 – менее 10%, 1 – от 11 до 25%, 2 – от 26 до 60%, 3 – от 61 до 99%, 4 – 100%.

По горизонтали – год наблюдений, лет; по вертикали – доля деревьев, %.

Fig. 1. The tree state indicators of Scots pine in lichen pine forests of the background area.

The degree of dechromization and defoliation of the crown, the proportion of dry branches: 0 – less than 10%, 1 – from 11 to 25%, 2 – from 26 to 60%, 3 – from 61 to 99%, 4 – 100%.

X-axis – the year of observations, years; y-axis – the proportion of trees, %.

шем существенно не изменялось, составляя в 2015 и 2019 гг. соответственно 68 и 71%. За исследованный период возросла доля деревьев со слабой (11–25%) и средней (26–60%) степенью дехромации. Во все годы наблюдений отсутствовали деревья 4 класса дехромации.

Дефолиация. Доля деревьев 0 класса дефолиации на фоновой территории в 1998 г. была равна $36 \pm 3.2\%$, к 2019 г. она увеличилась в 2.4 раза ($85 \pm 7.7\%$) (рис. 1). За этот период снизилась доля деревьев 1 класса дефолиации (с $25 \pm 3.2\%$ в 1998 г. до $15 \pm 1.4\%$ в 2019 г.). На начало исследо-

вания деревья со средней (2 класс) степенью дефолиации составляли $39 \pm 3.5\%$, в 2019 г. они отсутствовали. Деревья с сильной степенью (3 класс) дефолиации в исследуемых сосняках не были отмечены за весь период наблюдения.

Состояние вершин. Зафиксировано некоторое ухудшение состояния вершин деревьев в фоновом районе (рис. 1): доля деревьев сосны с неповрежденной вершиной достоверно не изменилась ($92 \pm 7.4\%$ – $89 \pm 8.8\%$). Участие деревьев с поврежденной вершиной сократилось по сравнению с

1998 г., однако достоверно увеличилась доля деревьев с усохшей вершиной: от 1 ± 0.09 до $8 \pm 0.7\%$.

Объем сухих сучьев. В 1998 г. в фоновом районе большинство деревьев отличалось наличием сухих сучьев (рис. 1). В 2005–2019 гг., напротив, основная часть деревьев не имела сухих сучьев. Участие деревьев без сухих сучьев с 1998 по 2019 гг. увеличилось примерно в 6 раз (1998 г. – $15 \pm 2.4\%$, 2019 г. – $89 \pm 7.9\%$). Доля деревьев, имеющих в объеме кроны от 11 до 25% сухих сучьев, за этот период уменьшилась в 6.5 раза и составила $10 \pm 0.9\%$. Значительно уменьшилась (с 19 ± 1.7 до $1 \pm 0.07\%$) доля деревьев с долей сухих сучьев от 26 до 60%.

Параметры состояния деревьев зоны импактных участков

Дехромация. По показателю дехромации за весь период наблюдений состояние деревьев сосны обыкновенной в импактной зоне практически оставалось на одном уровне. Участие деревьев с повреждением < 10% варьировало в пределах 52–69% (рис. 2). За период наблюдений несколько увеличилась доля деревьев со слабой степенью дехромации кроны (1998 г. – $31 \pm 2.3\%$, 2019 г. – $43 \pm 3.9\%$), но в 6 раз уменьшилась доля деревьев со средней степенью дехромации (1998 г. – $12 \pm 1.5\%$, 2019 г. – $2 \pm 0.3\%$).

Дефолиация. В период 2010–2019 гг. по сравнению с 1998 г. в исследуемых сосняках лишайниковых доля деревьев сосны без потерь хвои увеличилось в 3.8 раза и составила $77 \pm 6.9\%$ (рис. 2). Участие деревьев со слабой (1 класс), средней (2 класс) и сильной (3 класс) дефолиацией кроны сократилось. Доля деревьев со слабой степенью дефолиации кроны за рассматриваемый период уменьшилось в 1.5 раза и составила $22 \pm 1.9\%$. Если в 1998 году доля деревьев со средней степенью дефолиации кроны составляла $42 \pm 3.8\%$, то в 2015 и 2019 гг. деревья с такой степенью повреждения отсутствовали. В древостоях значительно (до $1 \pm 0.07\%$), уменьшилась доля участия деревьев с сильно выраженной потерей хвои. Эти изменения показывают, что по степени дефолиации кроны деревьев состояние древостоев улучшилось.

Состояние вершин. Повреждения верхушек деревьев могут быть вызваны воздействием высоких концентраций загрязняющих веществ в воздухе в результате разовых выбросов. Средняя доля деревьев со здоровой вершиной в 2019 г. по сравнению с 1998 г. ($95 \pm 6.7\%$) достоверно уменьшилась и составила $84 \pm 7.6\%$ (рис. 2). К 2019 г. значительно (до $12 \pm 1.1\%$) выросла доля деревьев с усыхающими и сухими вершинами.

Объем сухих сучьев. Наиболее значительные изменения состояния деревьев сосны в сосняках лишайниковых по этому показателю произошли в период с 1998 по 2005 гг., в дальнейшем измене-

ния были незначительны. Средняя доля деревьев без сухих сучьев в 2019 г. по сравнению с 1998 г. увеличилась в 5.8 раза и достигла $87 \pm 7.8\%$ от общего количества (рис. 2). Участие деревьев, имеющих от 11 до 25% сухих сучьев, за этот период уменьшилось в 4 раза и составило $12 \pm 1.1\%$. Значительно – до $1 \pm 0.09\%$ сократилась доля деревьев, имеющих в кроне от 26 до 50% сухих сучьев. Деревья, имеющие в кроне высокую долю (от 61 до 99%) сухих сучьев, отсутствовали.

Схожесть закономерностей, характеризующих изменение состояния древостоев в сосняках лишайниковых на импактных и фоновых территориях, может свидетельствовать о существенном влиянии на их состояние не только антропогенных, но и природных факторов, в частности влажности почв. В сосняках лишайниковых рассматриваемого региона запасы влаги могут варьировать от труднодоступных до оптимальных. Положительное влияние на влажность иллювиально-железистых почв сосняков лишайниковых оказывает мощность и глубина залегания цементированных прослоек. Эти прослойки выполняют роль водоупора. Они снижают интенсивность просачивания атмосферных осадков вглубь, способствуют более длительной задержке атмосферных осадков в верхних горизонтах почвенного профиля, улучшая тем самым снабжение корней растений влагой [21, 22].

Виталитетная структура

За период наблюдений с 1998 по 2019 гг. виталитетный спектр фоновых сосновых древостоев (51–66 км от источника загрязнения) существенно изменился в сторону улучшения (рис. 3а). Доля участия здоровых деревьев достоверно увеличилась (с 56 ± 5.0 до $76 \pm 6.8\%$), доля деревьев I класса повреждения уменьшилась в 1.5 раза, II класса повреждения – в 2 раза, свежий сухой (класс IVa) отсутствует.

В зоне влияния целлюлозно-бумажного производства в период с 1998 по 2019 гг. жизненное состояние древостоев сосны в целом также улучшилось (рис. 3б), однако следует отметить более высокую вариабельность виталитетной структуры сосновых древостоев по сравнению с фоновыми сосняками. В период 1998–2010 гг. регистрируется достоверное увеличение доли участия здоровых деревьев (с 32 ± 5.0 до $78 \pm 5.0\%$). В 2015 г. жизненное состояние древостоев ухудшилось по сравнению с 2010 г., а в дальнейшем снова наблюдалось улучшение их состояния. В 2019 г. доля здоровых деревьев увеличилась до $71 \pm 6.4\%$, при этом уменьшились доли деревьев разной степени поврежденности, что указывает на улучшение в целом состояния древостоев.

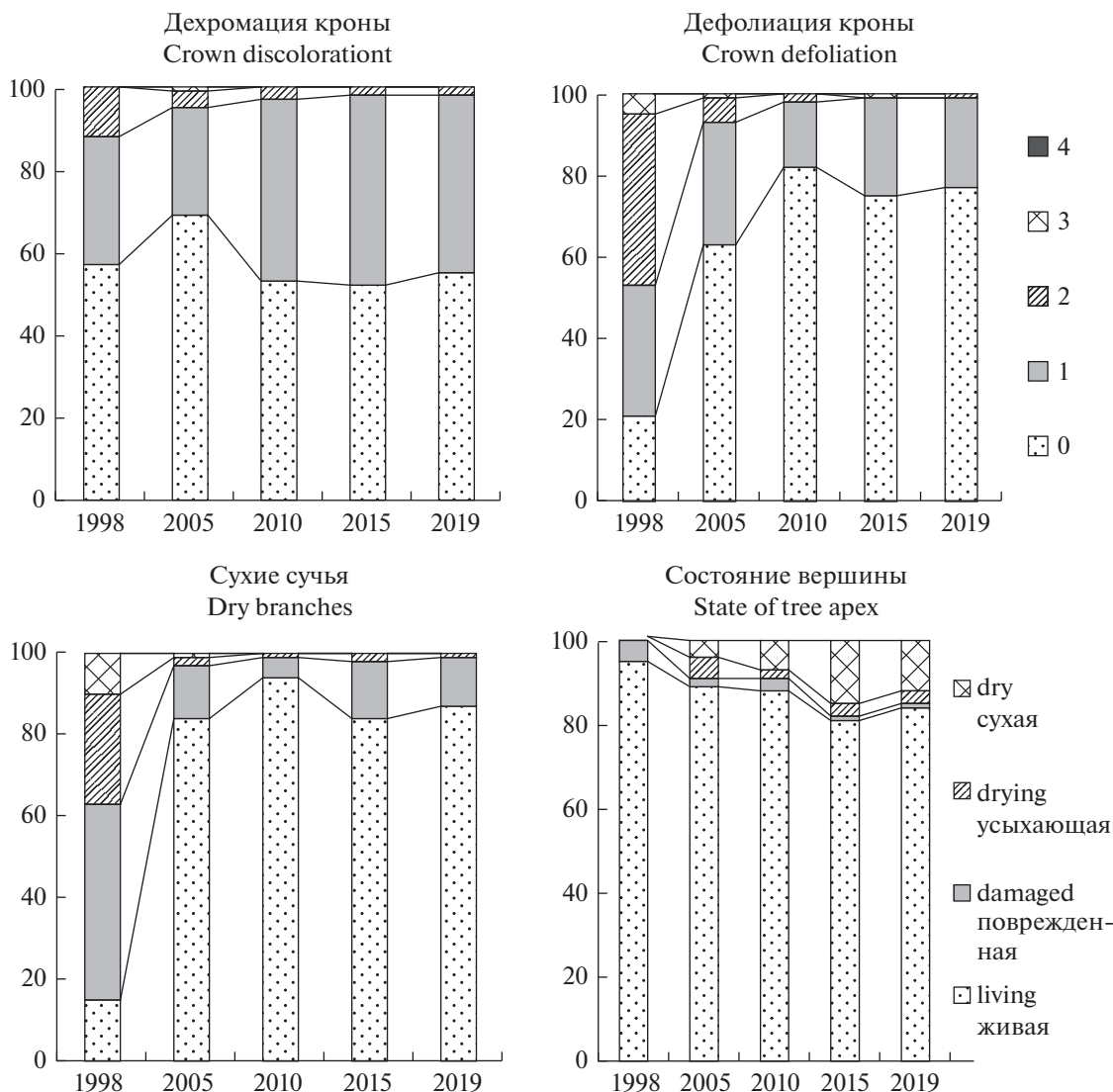


Рис. 2. Показатели состояния деревьев сосны обыкновенной в сосняках лишайниковых загрязненного района. Степень дехромации и дефолиации кроны, доля сухих ветвей: 0 – менее 10%, 1 – от 11 до 25%, 2 – от 26 до 60%, 3 – от 61 до 99%, 4 – 100%.

По горизонтали – год наблюдений; по вертикали – доля деревьев, %.

Fig. 2. The tree state indicators of Scotch pine in lichen pine forests of the contaminated area.

The degree of crown discoloration and defoliation, the proportion of dry branches: 0 – less than 10%, 1 – 11–25%, 2 – 26–60%, 3 – 61–99%, 4 – 100%.

X-axis – the years of observations; y-axis – the proportion of trees, %.

Индексы поврежденности

На фоновых участках индекс поврежденности древостоев сосны в 1998 г. варьировал от 0.59 до 0.77 (табл. 2), что характеризовало их как ослабленные. К 2005 г. ослабленным остался фитоценоз на ППП 28 из-за слома и усыхания вершин в результате повреждения их ветром. Сосняки на ППП 29 и 30 вошли в категорию “здоровые”. С 2010 до 2019 г. все древостои сосняков лишайниковых фоновой территории по индексу поврежденности характеризуются как здоровые.

Среднее значение индекса поврежденности древостоев импактной зоны в 2019 г. уменьшилось по сравнению с 1998 г. в 3.2 раза при диапазоне варьирования от 0.39 до 0.47 (табл. 2). Анализ динамики индексов поврежденности древостоев на этой территории за период с 1998 по 2019 гг. свидетельствует об улучшении жизненного состояния сосняков, произрастающих в зоне воздействия выбросов целлюлозно-бумажного производства АО “Монди СЛПК”. Если в 1998 г. исследуемые сосновые древостои были оценены

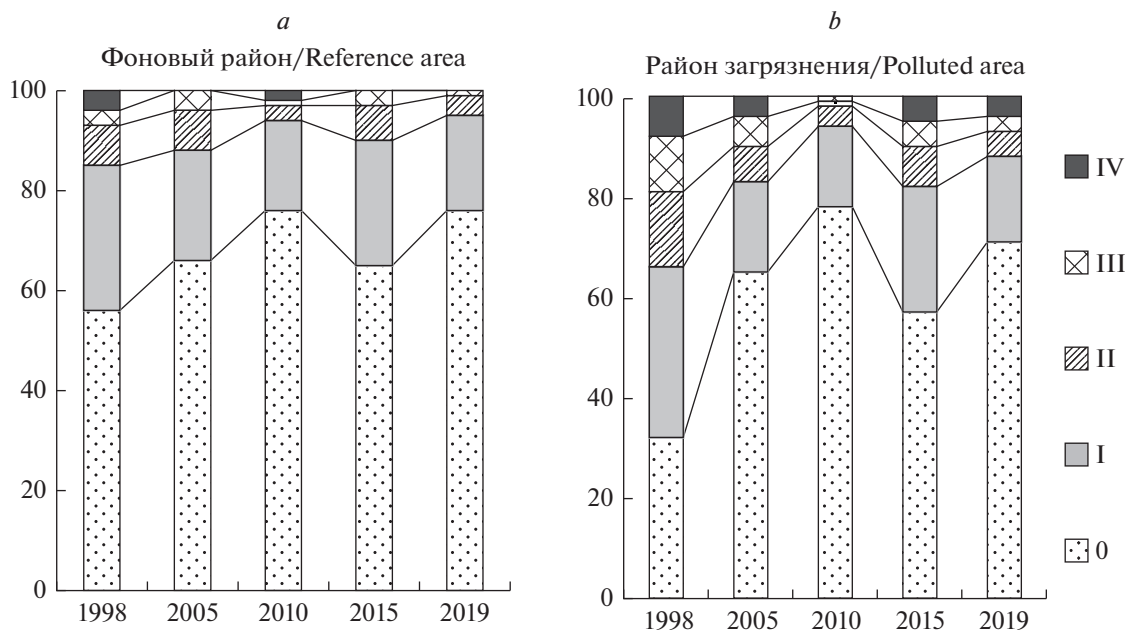


Рис. 3. Динамика виталитетной структуры древостоев сосняков лишайниковых в фоновом (а) и загрязненном (б) районах.

Категории состояния: 0 – <10%, I – от 11 до 25%, II – от 26 до 60%, III – от 61 до 99%, IV – 100% повреждений.
По горизонтали – год наблюдений; по вертикали – доля деревьев, %.

Fig. 3. Dynamics of the stands vitality structure in lichen Scots pine forests in the background (a) and polluted (b) areas.
Vitality categories: 0 – <10%, I – 11–25%, II – 26–60%, III – 61–99%, IV – 100% damage.

X-axis – year of observations; y-axis – proportion of trees, %.

как средне- и сильноповрежденные, в 2005 – как слабоповрежденные, то в 2010, 2015 и 2019 гг. – как здоровые.

Таким образом, в 2019 г. все исследованные сосновые древостои как фонового района, так и зоны воздействия аэротехногенных выбросов следует отнести к здоровым.

Значительное улучшение состояния древостоев в сосняках лишайниковых в импактной зоне в

период с 1998 по 2019 гг. произошло, в основном, за счет снижения степени дефолиации и дехромации крон деревьев. Однако значения этих параметров остаются в этом районе на более высоком уровне, чем в фоновом: в 2019 г. на фоновых территориях доля деревьев без дехромации хвои составила $71 \pm 6.4\%$, на загрязненных была достоверно ниже – $55 \pm 4.9\%$. Доля деревьев без потери хвои в фоне выросла до $85 \pm 7.7\%$, в импактной зоне – до $77 \pm 6.9\%$.

Таблица 2. Динамика индексов поврежденности сосновых древостоев, рассчитанных по запасу древесины, в фоновом районе и в условиях загрязнения среды выбросами “Монди СЛПК”

Table 2. The damage indices of Scots pine tree stands in the reference area and under pollution from Mondi SLPK, calculated on the sanding crop basis

Год наблюдений Year of observations	№ ППП и расстояние от АО “Монди СЛПК”, км Sample plot (Site) number and distance from Mondi SLPK, km					
	Site 13 (7.3 km)*	Site 14 (11.0 km)	Site 17 (11.2 km)	Site 28 (56.0 km)	Site 29 (51.0 km)	Site 30 (52.0 km)
1998	1.99	1.13	1.2	0.59	0.77	0.64
2005	0.85	0.70	0.68	0.66	0.42	0.49
2010	0.47	0.39	0.28	0.29	0.36	0.22
2015	0.37	0.50	0.40	0.30	0.50	0.40
2019	0.40	0.47	0.39	0.33	0.47	0.38

Примечание: * – здесь и в табл. 4 в скобках указано расстояние от “Монди СЛПК”.

Note: * – here and in the table 4 in brackets is the distance from Mondi SLPK.

Таблица 3. Распределение подроста сосны обыкновенной по категориям состояния в исследованных сосновых фитоценозах, экз./га

Table 3. Status categories of Scots pine undergrowth in Scots pine phytocoenoses, ind./ha

Номер ППП (расстояние от “Монди СЛПК”, км) Sample plot number (distance from Mondi SLPK, km)	Год наблюдений Year of observation	Всего Total	Жизненное состояние Life condition		
			благонадежный reliable	неблагонадежный unreliable	сухой dry
Сосновые леса в зоне действия выбросов АО “Монди СЛПК” Pine forests in the zone affected by Mondi SLPK emissions					
14 (11.0)	1998	758	629 (83%)	43 (6%)	86 (11%)
	2019	454	254 (56%)	54 (12%)	146 (32%)
17 (11.2)	1998	477	33 (7%)	233 (49%)	211 (44%)
	2019	508	283 (56%)	75 (15%)	150 (29%)
Сосновые леса фонового района Pine forests in the reference area					
29 (51)	1998	—	—	—	—
	2019	1082	1000 (92%)	75 (7%)	7 (1%)
30 (52)	1998	1134	400 (35%)	527 (47%)	207 (18%)
	2019	580	480 (83%)	87 (15%)	13 (2%)
28 (56)	1998	3030	1200 (39.5%)	1140 (37.5%)	690 (23%)
	2019	2046	1650 (81%)	125 (6%)	271 (13%)

Примечание: прочерк означает отсутствие данных.
Note: dash means no data.

На начальный период исследования (1998 г.) суммарное количество выбросов АО “Монди СЛПК” составило 31 тыс. т, поэтому одним из основных факторов, оказывающим влияние на развитие древостоев в этот период, предположительно было аэротехногенное загрязнение. По данным публичных экологических отчетов предприятия [9], количество выбросов уже к 2005 г. уменьшилось до 24 тыс. т и далее продолжало уменьшаться. За последние годы значительно (в 12 раз) уменьшились выбросы сероводорода и в 2 раза меркаптанов, отмечено сокращение эмиссии СО и специфических веществ.

Этими изменениями можно объяснить наблюдаемый характер динамики виталитетной структуры сосновых древостоев в период с 1998 по 2019 гг. Об улучшении их состояния свидетельствует увеличение доли здоровых деревьев и сокращение доли слабо- и сильноповрежденных как на загрязненной, так и на фоновой территориях. Динамика жизненного состояния древостоев на загрязненной и фоновой территориях имеет одинаковую направленность, поскольку все исследуемые фитоценозы находятся на одной стадии развития, произрастают в близких по типу условиях местообитания. Несмотря на то, что поврежденность сосняков лишайниковых на импактной территории к началу исследований была довольно высокой, имеющийся потенциал естественной устойчивости позволил им восста-

новиться при уменьшении уровня аэротехногенной нагрузки.

Состояние подроста

Под пологом исследуемых сосняков лишайниковых подрост состоит, в основном, из сосны обыкновенной, единично встречаются ель сибирская и береза. В ближнем к источнику эмиссии загрязняющих веществ сосняке мшисто-лишайниковом (ППП 13) подрост практически отсутствует. На территории импактной зоны небольшое количество подроста (454–758 экз га⁻¹), обнаружено в сосняках лишайниковых на ППП 14 и ППП 17 (табл. 3). В 1998 г. в сосняке на ППП 17, древостой которого отличается более высокой густотой (табл. 1) численность подроста была более низкой, чем на ППП 14, а в 2019 г. по этому показателю ППП 14 и 17 не различались. На фоновой территории подрост сосны представлен в целом более значительным числом особей – от 580 до 2046 экз./га. Однако следует отметить, что при близкой густоте древостоев на ППП 30 в фоновой зоне и на ППП 14 в импактной зоне численность подроста является сопоставимой (580–1134 экз га⁻¹ и 454–758 экз га⁻¹ соответственно). На ППП 28 и 29, отличающихся в 1.5–2 раза более низкой густотой древостоя, численность подроста превышает указанные величины в 2–4 раза (табл. 3).

Таблица 4. Индекс жизненного состояния (%) подроста сосны обыкновенной в сосняках фонового района и в условиях загрязнения выбросами “Монди СЛПК”**Table 4.** The vital state index of Scots pine undergrowth in the pine forests of the reference area and under pollution from Mondi SLPK

Год наблюдений Year of observation	Site 14 (11 km)	Site 17 (11.2 km)	Site 29 (51 km)	Site 30 (52 km)	Site 28 (56 km)
1998	86	31	–	59	63
2019	62	63	96	90	84

Примечание: прочерк означает отсутствие данных.
Note: Dash means no data.

Одним из показателей состояния возобновления является высотная структура подроста. Подрост обычно подразделяют по высоте на три категории крупности: мелкий – до 0.5 м, средний – от 0.6 до 1.5 м и крупный – более 1.5 м [23]. В сосняках лишайниковых как в пределах импактной зоны, так и на фоновой территории представлен преимущественно крупный подрост сосны и подрост средней высоты (рис. 4). В условиях загрязнения зоны в 2019 г. отмечалось отсутствие мелкого подроста сосны. В сосняках лишайниковых фонового района на ППП 28 и 29 мелкий подрост представлен в количестве от 264 до 438 экз. га⁻¹, однако преобладает крупный подрост. Следует также отметить, что в фоновом сосняке с более высокой полнотой древостоя (ППП 30) под пологом значительно преобладает подрост крупной категории, а численность новых поколений является очень низкой.

Оценка состояния подроста сосны (табл. 3) показала, что в 2019 г. в фоновом районе на всех пробных площадях преобладал (от 80 до 90%) “благонадежный” подрост, по сравнению с 1998 г. на ППП 28 и 30 его доля увеличилась примерно в 2 раза. Участие “неблагонадежного” подроста к 2019 г. сократилось в 3–6 раз (с 37–47 до 6–15%). Доля сухого подроста на фоновой территории в 2019 г. по сравнению 1998 г. сократилась с 18–23 до 2–13%.

В сосновом фитоценозе на ППП 14, подверженном влиянию аэротехногенного загрязнения, большую часть возобновления (83%) в 1998 г. также составлял “благонадежный” подрост. К 2019 г. его доля уменьшилась до 56%, при этом возросло участие “неблагонадежного” (с 6 до 12%) и сухого (с 11 до 32%) подроста. В сосняке импактной зоны на ППП 17 доля “благонадежного” подроста с 1998 по 2019 гг., напротив, многократно увеличилась (с 7 до 56%), а доля “неблагонадежного” снизилась примерно в 3 раза (с 49 до 15%). В сосняках зоны загрязнения довольно много сухого подроста. Его доля за период исследования на ППП 14 увеличилась в 3 раза (с 11 до 32%), а на ППП 17 несколько снизилась (с 44 до 29%). В целом в 2019 г. в сосняках лишайниковых в условиях загрязне-

ния доля участия “благонадежного” подроста (56%) была существенно ниже, чем в фоновом районе (80–90%).

В 1998 г. по величине индекса жизненного состояния подрост сосны на ППП 14 и 17, расположенных в зоне аэротехногенного воздействия, мог быть охарактеризован соответственно как здоровый и сильно ослабленный, в 2019 г. – как ослабленный (табл. 4). В сосняках на фоновой территории в 1998 г. индекс жизненного подрост сосны составил от 59 до 63% (ослабленный), а в 2019 г. – от 84 до 96%, что характеризует его как здоровый.

Естественное возобновление леса является динамичным процессом, а его успешность определяется типом леса, структурой насаждения и биологическими особенностями древесных пород. Результаты исследования возобновления сосны в сосняках лишайниковых загрязненной территории показали, что на данный момент лесовозобновление недостаточное, подрост по состоянию характеризуется как ослабленный, при этом мелкий подрост полностью отсутствует. Это может быть вызвано не только действием загрязнения, но и конкуренцией с древостоем за ресурсы минерального питания [21]. В то же время подрост сосны в сосняках фонового района по индексу жизненного состояния характеризуется как здоровый.

Лесовозобновительный процесс в лесных фитоценозах во многом определяется количеством и качеством семян, поступивших в почву [24]. Известно, что в условиях аэротехногенного загрязнения наблюдаются нарушения в репродуктивной деятельности растений [25–27]. Показано также, что в лесных сообществах корневая конкуренция со стороны древостоя является одним из факторов, определяющих развитие подроста, и имеет особое значение в том случае, когда какой-нибудь фактор находится в минимуме. В сосняках лишайниковых исследуемого региона к этим факторам относится бедность почвы элементами питания и также недостаток влаги в отдельные периоды наблюдений [21, 22]. Ослабление и гибель соснового подроста под пологом материн-

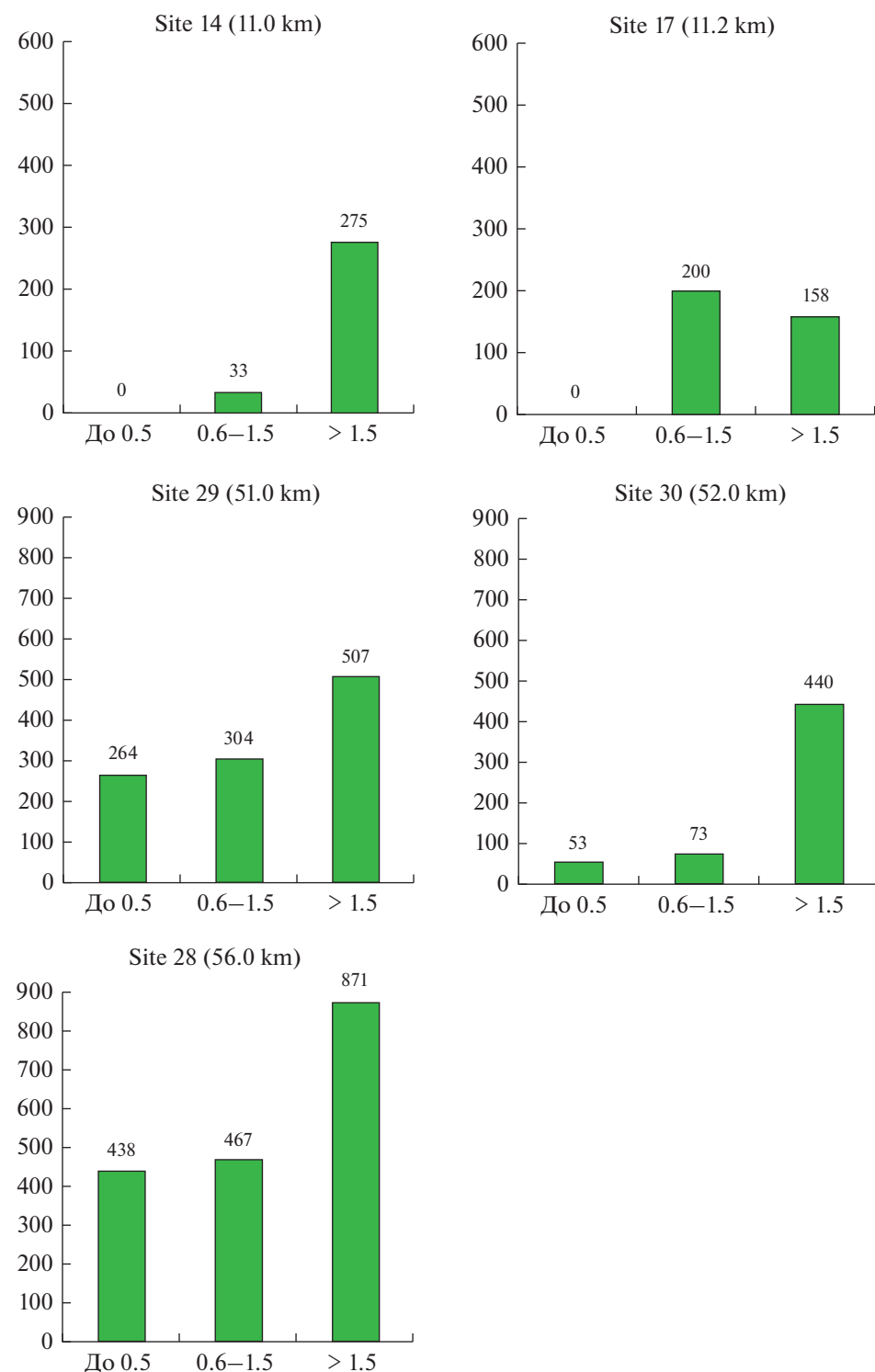


Рис. 4. Распределение подроста сосны обыкновенной по высоте в сосновых древостоях загрязненной (ППП 14, 17) и фоновой (ППП 28, 29, 30) территорий (данные 2019 г.).

По горизонтали – высота, м; по вертикали – количество подроста, экз./га.

Fig. 4. Height distribution of Scots pine undergrowth in pine stands of the polluted (Site 14, 17) and background (Site 28, 29, 30) territories (2019 data).

X-axis – height, m; y-axis – number of undergrowth, ind./ha.

ского древостоя сосняков лишайниковых в импактной зоне, видимо, определяется, с одной стороны, корневой конкуренцией между древостоем и подростом за питательные элементы и влагу, с другой — аэротехногенным загрязнением выбросами целлюлозно-бумажного производства.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подведены итоги 20-летнего (1998–2019 гг.) мониторинга состояния древостоев сосняков лишайниковых в условиях аэротехногенного загрязнения выбросами целлюлозно-бумажного производства АО “Монди Сыктывкарский лесопромышленный комплекс” (Республика Коми), функционирующего с 1969 г. В начале исследований по совокупности показателей жизненного состояния древостоя и подроста сосновые древостои в районе аэротехногенного загрязнения были охарактеризованы как слабо- и среднеповрежденные. За период исследований в связи со снижением объема аэротехногенных выбросов выявлено улучшение жизненного состояния древостоев в пределах импактной зоны. В 2005 г. древостои сосняков лишайниковых, произрастающих на загрязненных участках, характеризовались как слабоповрежденные, в период с 2010 по 2019 гг. — как здоровые.

Для сосняков лишайниковых импактной зоны характерно нарушение лесовозобновительного процесса. Если по общей численности подростов при одинаковой густоте древостоя существенных различий между сосняками импактной и фоновой зон нет, то по высотной структуре выявлены заметные различия. В составе соснового подростов на территории импактной зоны отсутствуют малоразмерные особи высотой менее 0.5 м, которые представляют наиболее молодые поколения. По индексу жизненного состояния подрост сосны в условиях зоны загрязнения характеризуется как “ослабленный”, на фоновой территории — как “здоровый”.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках темы НИР “Зональные закономерности динамики структуры и продуктивности первичных и антропогенно измененных фитоценозов лесных и болотных экосистем европейского Северо-Востока России” (122040100031-8) и хозяйственной темы “Оценка долговременного влияния АО “Монди СЛПК” на биологическое разнообразие в районе производства” (договор № 45-2018 от 24 апреля 2018 г.).

Выражаем благодарность Н.В. Торлоповой, принимавшей активное участие в сборе и анализе экспериментального материала в разные периоды исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев А.С. 1997. Мониторинг лесных экосистем. СПб. 116 с.
2. Алексеев А.С. 2003. Мониторинг лесных экосистем. 2-е изд. СПб. 215 с.
3. Ярмишко В.Т., Баккал И.Ю., Борисова О.В., Горшков В.В., Катютин П.Н., Лянгузова И.В., Мазная Е.А., Ставрова Н.И., Ярмишко М.А. 2009. Динамика лесных сообществ Северо-Запада России. СПб. 276 с.
4. Леса Республики Коми. 1999. М. 332 с.
5. Яблоков А.В. 1987. Популяционная биология. М. 303 с.
6. Алексеев А.С. 1990. Анализ экологической структуры популяции *Picea abies* (Pinaceae) в условиях атмосферного загрязнения. — Бот. журн. 75(9): 1277–1284.
7. Ярмишко В.Т., Горшков В.В., Ставрова Н.И. 2003. Виталитетная структура *Pinus sylvestris* L. в лесных сообществах с разной степенью и типом антропогенной нарушенности. — Растительные ресурсы. 39(4): 1–19.
8. Семечкин И.В. 1970. Динамика возрастной структуры древостоев и методы ее изучения. — В кн.: Вопросы лесоведения. Красноярск. Т. 1. С. 422–446.
9. Экологические отчеты 2006, 2009–2010, 2013–2015. Mondi Сыктывкарский ЛПК <https://www.mondigroup.com/en/sustainability/sustainability-reports-and-publications/>
10. Торлопова Н.В., Робакидзе Е.А. 2003. Влияние поллютантов на хвойные фитоценозы (на примере Сыктывкарского лесопромышленного комплекса). Екатеринбург. 147 с.
11. *Manual on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forest.* 1994. Hamburg, Prague. 177 p.
12. *Manual on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forest. Part III.* 2002. <http://www.icp-forests.org/pdf/manual3.pdf>
13. *Forêts déperissement et pollution atmosphérique à longue distance: Résultats de la notation 1992 du réseau CEE en France.* 1993. — La forêt privée. 211: 61–63.
14. Kandler O. 1993. Air pollution and forest decline in Central Europe. — 15th Int. Bot. Cong.: Abstr. Yokogama, P.58.
15. Bullarin-Denti A., Cocucci S.M., Di Girolamo F. 1998. Environmental pollution and forests stress: A multidisciplinary approach study on alpine forest ecosystems. — Chemosphere. 4–5: 1049–1054. [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(97\)10170-9](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(97)10170-9)
16. Захаров В.К. 1967. Лесная таксация. М. 406 с.

17. *ОСТ 56-69-83*. Площади пробные лесоустroительные. Методы закладки. 1983. М. 60 с.
18. *Лесотаксационный справочник для Северо-Востока европейской части СССР*. 1986. Архангельск. 358 с.
19. *Алексеев В.А.* 1989. Диагностика жизненного состояния деревьев и древостоев. — *Лесоведение*. 4: 51–57.
20. *Мелехов И.С., Корконосова Л.И., Чертовской В.Г.* 1965. Руководство по изучению типов концентрированных вырубок. 2-е изд. М.: Наука. 180 с.
21. *Листов А.А.* 1986. Боры беломошники. М.: Агропромиздат. 181 с.
22. *Верхоланцева Л.А.* 1965. О влажности почв сухих боров. — *Тр. Коми филиала АН СССР*. 14: 49–56.
23. *Мелехов И.С.* 1989. Лесоводство. М.: Агропромиздат. 302 с.
24. *Мелехов И.С.* 1960. Рубки и возобновление леса на Севере. Архангельск. 180 с.
25. *Федотов И.С., Карабань Р.Т., Тихомиров Ф.А., Сисигина Т.И.* 1983. Оценка действия двуокиси серы на сосновые насаждения. — *Лесоведение*. 6: 23–27.
26. *Ставрова Н.И.* 1990. Семеношение сосны. — Влияние промышленного атмосферного загрязнения на сосновые леса Кольского полуострова. Л. С. 94–103.
27. *Васфилов С.П.* 2005. Влияние загрязнения воздуха на сосну обыкновенную. Екатеринбург. 212 с.

Monitoring the State of Scots Pine in Lichen Pine Forests Affected by Emissions from Mondi Syktyvkar Timber Industry Complex (Komi Republic)

E. A. Robakidze^{a, *}, K. S. Bobkova^a

^a*Institute of Biology of Komi Science Centre, Ural Branch RAS, Syktyvkar, Russia*

^{*}*e-mail: robakidze@ib.komisc.ru*

Abstract—The paper reviews the results of the 1998–2019 studies on the effect of the aerotechnogenic pollution from the pulp and paper production of the JSC Mondi Syktyvkar Timber Industry Complex (Mondi SLPK) operating since 1969, on the vital state of trees, tree stands and undergrowth in lichen pine forests located at different distances from the source of emission. Within the observation period, we did not find any changes in composition of pine stands both in the affected zone and background areas. At the beginning of our studies, pine phytocenoses in the area affected by air pollution were characterized as slightly and moderately damaged by the majority of vital state parameters. From 1998 to 2019, the vital state of stands growing both in the pulp and paper mill-impacted zone and in the background area improved. In 2005, lichen pine forests growing in the polluted zone were characterized as slightly damaged, and in 2010–2019 — as healthy. In 2019, as compared to 1998, the damage indices of stands in the impacted zone decreased by 3.2 times and ranged from 0.37 to 0.50. In the emission zone, forest regeneration in lichen pine forests is weak. The undergrowth is mostly formed by pine trees of different height, but small trees are absent. In the impacted areas, the density of undergrowth decreased, as compared to the background territory. According to the vital state index, the undergrowth in the affected zone is rated as weakened, and in the background area — as healthy.

Keywords: monitoring, aerial anthropogenic pollution, lichen pine forests, stand vital state, defoliation, discoloration, damage index, undergrowth

ACKNOWLEDGEMENTS

The study was carried out within the framework of the research theme “Zonal patterns of the structural and productivity dynamics of primary and anthropogenically modified forest and peat ecosystems of the European North-East of Russia” (122040100031-8) and the contract-based theme “Assessment of the long-term effects of the JSC Mondi SLPK on the biological diversity of the production area” (contract no. 45-2018 dated by April 24, 2018).

The authors are grateful to N.V. Torloпова for her involvement in collecting and analyzing the experimental material in different periods of research.

REFERENCES

1. *Alekseev A.S.* 1997. [Monitoring of forest ecosystems]. Saint Petersburg. 116 p. (In Russian)
2. *Alekseev A.S.* 2003. [Monitoring of forest ecosystems]. 2nd edition. Saint Petersburg. 215 p. (In Russian)
3. *Yarmishko V.T., Bakkal I.Yu., Borisova O.V., Gorshkov V.V., Katyunin P.N., Lyanguzova I.V., Maznaya E.A., Stavrova N.I., Yarmishko M.A.* 2009. [Dynamics of forest communities in Northwest Russia]. — Saint Petersburg. 276 p. (In Russian)
4. [Forests of the Komi Republic]. 1999. Moscow. 332 p. (In Russian)
5. *Yablokov A.V.* 1987. [Population biology]. Moscow. 303 p. (In Russian)

6. *Alekseev A.S.* 1990. Analysis of ecological structure of the *Picea abies* (Pinaceae) population growing under atmospheric pollution. – Bot. zhurn. 75(9): 1277–1284. (In Russian)
7. *Yarmishko V.T., Gorshkov V.V., Stavrova N.I.* 2003. *Pinus sylvestris* L. vital state structure in the tree layer of pine forest with different degree and type of anthropogenic disturbance (Kola Peninsula). – Rastitelnye resursy. 39(4): 1–19. (In Russian)
8. *Semechkin I.V.* 1970. Dynamics of age structure of forest stands and methods of her studying. In: [Problems of forest science]. Vol. 1. Krasnoyarsk. 422–446. (In Russian)
9. *Sustainability reports.* 2006, 2009–2010, 2013–2015. Mondi Syktyvkar LPK. <https://www.mondigroup.com/en/sustainability/sustainability-reports-and-publications/>
10. *Torloпова N.V., Robakidze E.A.* 2003. [The effect of pollutants on coniferous phytocenoses (by the example of the Syktyvkar timber complex)]. Ekaterinburg. 147 p. (In Russian)
11. *Manual* on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forest. 1994. Hamburg, Prague. 177 p.
12. *Manual* on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forest. Part III. 2002. <http://www.icp-forests.org/pdf/manual3.pdf>
13. *Forêts dépérissement et pollution atmosphérique à longue distance: Résultats de la notation 1992 du réseau CEE en France.* 1993. – La forêt privée. 211: 61–63.
14. *Kandler O.* Air pollution and forest decline in Central Europe. 1993. – 15th Int. Bot. Cong.: Abstr. Yokogama, P. 58.
15. *Bullarin-Denti A., Cocucci S.M., Di Girolamo F.* 1998. Environmental pollution and forests stress: A multidisciplinary approach study on alpine forest ecosystems. – Chemosphere. 4–5: 1049–1054. [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(97\)10170-9](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(97)10170-9)
16. *Zakharov V.K.* 1967. [Forest taxation]. Moscow. 406 p. (In Russian)
17. *Industry Standard 56-69-83.* [Forest inventory plots. Methods for establishing]. 1983. Moscow. 60 p. (In Russian).
18. [Forest mensuration manual for the Northeast of the European part of the USSR]. 1986. Arkhangelsk. 358 p. (In Russian).
19. *Alekseev V.A.* 1989. [Diagnostics of a vital state of trees and forest stands]. – Lesovedenie. 4: 51–57. (In Russian)
20. *Melekhov I.S., Korkonosova L.I., Chertovskij V.G.* 1965. [Types of concentrated cuttings study guide]. Moscow. 180 p. (In Russian)
21. *Listov A.A.* 1986. [Lichen pine forests]. Moscow. 181 p.
22. *Verkholantseva L.A.* 1965. [On the soil moisture in dry lichen pine forests]. – Trudy Komi Filiala AN SSSR. 14: 49-56. (In Russian)
23. *Melekhov I.S.* 1989. [Forestry]. Moscow. 302 p.
24. *Melekhov I.S.* 1960. [Cutting and renewal of the forests in the north]. Arkhangelsk. 180 p. (In Russian)
25. *Fedotov I.S., Karaban R.T., Tikhomirov F.A., Sisigina T.I.* 1983. [Assessment of the sulfur dioxide effect on pine plantations]. – Lesovedeniye. 6: 23–27. (In Russian)
26. *Stavrova N.I.* 1990. [Pine seed]. In: [Effects of industrial atmospheric pollution on pine forests of the Kola Peninsula]. Leningrad. P. 94–103. (In Russian)
27. *Vasfilov S.P.* 2005. [The effect of air pollution on the pine]. Ekaterinburg. 212 p. (In Russian)