

АНТРОПОГЕННОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА РАСТИТЕЛЬНЫЕ РЕСУРСЫ

МОНИТОРИНГ СОСТОЯНИЯ ДРЕВЕСНЫХ РАСТЕНИЙ В СОСНЯКАХ ЧЕРНИЧНЫХ ПРИ ЗАГРЯЗНЕНИИ ВЫБРОСАМИ СЫКТЫВКАРСКОГО ЛЕСОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА (РЕСПУБЛИКА КОМИ)

© 2021 г. Е. А. Робакидзе^{1, *}, Н. В. Торлопова¹, К. С. Бобкова¹, С. И. Наймушина¹

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

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

Поступила в редакцию 14.08.2020 г.

После доработки 17.02.2021 г.

Принята к публикации 10.06.2021 г.

Исследовано влияние загрязнения среды выбросами целлюлозно-бумажного производства (АО “Монди Сыктывкарский лесопромышленный комплекс”), функционирующего с 1969 г, на жизненное состояние древостоев и подроста в сосняках зеленомошной группы типов, расположенных на разном расстоянии от источника эмиссии. Выявлено, что за последние 20 лет (1998–2018 гг.) в сосновых лесах, в связи со снижением объема аэротехногенных выбросов, отмечается улучшение жизненного состояния древесных растений. В 1998 г. древостои сосняков зоны действия выбросов по индикационным признакам были охарактеризованы как слабо- и среднеповрежденные, в 2004 г. — слабоповрежденные, в 2009 г. — здоровые. В 2014 и 2018 гг. они отнесены к здоровым и слабоповрежденным. Древостои сосновых лесов в фоновом районе в период наблюдений с 1998 по 2018 гг. по индикационным показателям были здоровыми. В сосняках загрязненной территории лесовозобновительный процесс неудовлетворительный, количество подроста хвойных составляет 39–1064 экз./га. В 2018 г. по сравнению с 1998 г. количество подроста ели в сосняках черничных в зоне действия выбросов в среднем уменьшилось в 1.6 раза, при этом его состояние улучшилось.

Ключевые слова: мониторинг, аэротехногенное загрязнение, сосновые леса, древостой, подрост, дефолиация, дехромация, жизненное состояние, индекс поврежденности

DOI: 10.31857/S0033994621030067

Проблема оценки влияния атмосферного загрязнения на фитоценозы и отдельные виды растений и их ценопопуляции, произрастающие в конкретных экологических условиях достаточно актуальна [1–4]. Одним из условий устойчивого управления лесами является изученность их состояния. Система контроля природной среды складывается из экологического мониторинга и анализа полученных данных, на основе которых принимаются решения о перспективах функционирования и практического использования экосистем [5]. Проведение регулярного мониторинга состояния бореальных лесов является важной задачей охраны окружающей среды. В настоящее время этот аспект исследований приобрел особую актуальность в связи с существенным сокращением объема атмосферных выбросов загрязняющих веществ [6–8].

Сосна обыкновенная занимает одну из ведущих позиций в формировании лесных биогеоценозов на Европейском северо-востоке России. Способность создавать значительную биомассу в

условиях непригодных для других видов древесных растений — свидетельство ее больших адаптивных возможностей [9]. Благодаря большой величине листовой поверхности, сосновые фитоценозы являются хорошим поглотителем аэрозольных загрязнений из атмосферного воздуха и могут накапливать значительные количества примесей, служа естественным их аккумулятором и препятствуя распространению загрязнений в окружающей среде [10].

В последнее время при оценке состояния лесных фитоценозов используется концепция виталитетной структуры древостоя. Распределение деревьев по категориям состояния (виталитета) получило название виталитетного спектра. По отношению к сосновым лесам эта концепция реализована в работе В.Т. Ярмишко с соавторами [11], выполненной на территории Кольского полуострова. Использование этого понятия и соответствующих методов анализа позволяет определить особенности каждого древостоя и проводить

сравнительный анализ их состояния на определенной территории.

Из всех органов растений листья являются самыми чувствительными к действию атмосферного загрязнения [12, 13]. Воздушное загрязнение негативно влияет на возрастную структуру [1, 14] и метаболическую активность [2, 3, 10] хвои сосны. Установлено, что в зоне атмосферного загрязнения выбросами целлюлозно-бумажного производства у хвойных происходит уменьшение содержания в листьях пигментов. В хвое сосен выявлено увеличение соотношения хлорофиллов *a* и *b* [15].

АО “Монди Сыктывкарский лесопромышленный комплекс” (“Монди СЛПК”) является крупнейшим предприятием целлюлозно-бумажного производства в Европейской части России. Вместе с тем, он является источником выбросов в атмосферу разнообразных загрязнителей. 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 [16].

В настоящее время для определения состояния лесов широкое распространение получил разработанный IUFRO метод мониторинга лесов на региональном и локальном уровнях в процессе выполнения программы ICP-Forests [17, 18]. Мониторинг состояния лесов успешно проводится и в странах Европы [19–21].

Цель данной работы — оценить изменения состояния древостоев и подроста сосновых фитоценозов средней тайги в зоне длительного загрязнения атмосферными выбросами целлюлозно-бумажного производства АО “Монди СЛПК”.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Изучение жизненного состояния сосновых фитоценозов, произрастающих на загрязненной выбросами целлюлозно-бумажного производства “Монди СЛПК” территории, проводилось с 1998 по 2018 гг. В сосновых насаждениях черничного ряда заложены постоянные пробные площади (ППП), расположенные на разном расстоянии к северо-востоку от источника загрязнения (в направлении доминирующей составляющей региональной розы ветров). Сосновые леса на фоновой территории (ППП 23, 24) находятся на расстоянии 48.5–50 км от источника эмиссии, на загрязненной территории сосняки расположены на расстоянии 1.3, 6.5, 11.0, 11.2 км от источника выбросов, соответственно ППП 3, 19, 15, 18 (табл. 1).

Сосняки черничные (*Pinetum myrtillosum*) на фоновой территории и разнотравные (*Pinetum*

herbosum) (исходно черничные) на загрязненной территории произрастают на иллювиально-гумусовых железистых подзолах. Они представляют собой фитоценозы послерубочного и послепожарного происхождения с разновозрастными и условно-одновозрастными древостоями. Древесный ярус состоит из сосны *Pinus sylvestris* L., осины *Populus tremula* L., березы пушистой *Betula pubescens* Ehrh., березы повислой *B. pendula* Roth и ели сибирской *Picea obovata* Ledeb. В подлеске в незначительном количестве присутствуют можжевельник *Juniperus communis* L., рябина *Sorbus aucuparia* L., ивы *Salix* sp. Подрост представлен в основном елью, изредка встречаются сосна, береза и пихта. Травяно-кустарничковый ярус с общим проективным покрытием (ОПП) 40–70% формируют более 20 видов растений, среди которых доминируют черника *Vaccinium myrtillus* L., брусника *Vaccinium vitis-idea* L., щучка извилистая *Avenella flexuosa* L. и ожика волосистая *Luzula pilosa* (L.) Willd. В мохово-лишайниковом покрове с общим проективным покрытием 60–90% преобладают *Pleurozium schreberi* (Brid.) Mitt., *Hylocomium splendens* (Hedw.) Br., Sch et Cmb и *Polytrichum commune* Hedw.

Выбор экспериментальных участков для проведения исследований предусматривал сопоставимость насаждений, расположенных в зоне воздействия выбросов АО “Монди СЛПК” и фоновом районе по основным лесоводственно-таксационным характеристикам и лесорастительным условиям. Таксационные параметры древостоев определяли согласно методам лесной таксации [22, 23]. Обработку материалов проводили по “Лесотаксационному справочнику...” [24]. Определение жизненного состояния деревьев сосны в древостоях выполнено согласно “Руководству...” [17, 18].

Внешний вид дерева определяется совокупностью признаков, каждый из которых может быть достаточен для оценки поврежденности. С помощью бинокля (БПЦ 2 12 × 45М, Россия) с расстояния, равного высоте дерева, у всех живых деревьев на ППП оценивали в баллах: степень дехромации (изменение цвета хвои), которая является важным признаком и первым из визуальных индикаторов изменения состояния дерева. Информативным признаком, характеризующим состояние дерева, является и степень дефолиация, т.е. степень изреживания кроны по отношению к абсолютно здоровому дереву. Известно, что в зоне аэротехногенного загрязнения снижается продолжительность функционирования хвои. В естественных сосняках средней тайги продолжительность жизни хвои достигает 8 лет [25] и с 5-летнего возраста начинается ее интенсивный опад, тогда как в условиях загрязнения выбросами целлюлозно-бумажно-

Таблица 1. Лесоводственно-таксационная характеристика древостоев исследуемых сосновых лесов
Table 1. Silvicultural and mensurational characteristics of the studied pine forest stands

Номер ППП (расстояние от Монди СЛПК, км) Sample plot (distance from Mondi SLPK, km)	Тип леса Forest type	Год наблюдений Year of observation	Состав древостоя Composition of tree stand	Возраст, лет Age, years	Средние Average		Бонитет Forest capacity	Общий запас, м³/га Total stock, m³/hectare	
					высота, м height, m	диаметр, см diameter, cm		растущие growing	сухие dry
Сосновые леса в зоне действия выбросов АО “Монди СЛПК” Pine forests in the zone affected by Mondi SLPK emissions									
3 (1.3)	Разнотравный Mixed herbs	1998 2018	9P1S + B 8P1S1B	65—85 75—105	25.0 26.1	24.6 28.0	I II	413.0 416.5	22.5
19 (6.5)	Черничный влажный Wet bilberry	1998 2018	10P + S, sinB 10P + S, sinB	85—100 95—120	14.6 17.0	14.0 20.0	IV IV	210.0 262.0	2.9
18 (11.0)	Черничный свежий Fresh bilberry	1998 2018	9P1B 9P1B	75—100 85—120	19.0 21.7	16.4 18.0	III IV	309.0 342.3	4.2
15 (11.2)	Черничный свежий Fresh bilberry	1998 2018	9P1B + S 9P1B + S	85—100 95—120	20.0 23.3	17.3 22.5	III III	308.7 354.0	11.0
Сосновые леса фонового района Pine forests in the reference area									
23 (48.5)	Черничный свежий Bilberry fresh	1998 2018	9P1B + A,S 9P1B + A,S	55—75 65—95	18.8 20.9	15.1 20.0	II III	258.0 417.5	20.3
24 (49.0)	Разнотравно-чернич- ный Mixed herbs bilberry	1998 2018	9P1B + A,S 9P1B + A,S	50—70 60—90	19.7 20.4	20.6 25.1	I II	237.0 322.0	8.4

Примечание: P – *Pinus sylvestris*, S – *Picea obovata*, A – *Populus tremula*, B – *Betula* spp.
Note: P – *Pinus sylvestris*, S – *Picea obovata*, A – *Populus tremula*, B – *Betula* spp.

го производства в этом регионе продолжительность жизни хвой сосны составляет 3–4 года [14].

По степени дехромации хвой и дефолиации деревья распределяли по четырем классам, используя следующую шкалу: 0 – потеря или дехромация хвой <10%, 1 – 11–25%, 2 – 26–60%, 3 – 61–99%, 4 – 100%. Кроме того, учитывали долю крупных сухих ветвей 1-го порядка в кроне по шкале: 0 – < 10%, 1 – 11–25%, 2 – 26–50%, 3 – 51–99% и отдельно состояние вершины, как наиболее важной части дерева (0 – живая, 1 – поврежденная, 2 – усыхающая и 3 – сухая). Повреждения вершин могут быть вызваны как длительным воздействием высоких концентраций загрязняющих веществ в воздухе, так и разовыми выбросами.

Важнейшее значение при организации и проведении мониторинга состояния лесов и индикации качества окружающей природной среды имеет распределение деревьев по классам повреждения – экологическая структура насаждения [7]. Согласно А.В. Яблокову [26], экологическая структура популяции – это расчленение древостоя на пространственно обособленные группы деревьев, находящиеся в специфических взаимосвязях с биотическими и абиотическими факторами среды. При антропогенном загрязнении биотопа популяция распадается на группировки особей, находящихся в различном состоянии жизнедеятельности [27].

С учетом степени дефолиации, дехромации, доли сухих сучьев в кроне и состояния вершины, каждому дереву в исследуемых сосняках был присвоен класс повреждения:

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

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

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

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

– IV класс – отмершее дерево (повреждение составляет 100%).

Отмершие деревья делятся на два подкласса: IVa (свежий сухостой) и IVб (старый сухостой: хвоя отсутствует, постепенно опадают ветви и кора). Согласно В.А. Алексееву [28], старый сухостой практически не влияет на поврежденность древостоя в целом, но при расчете необоснованно снижает его жизненное состояние, поэтому мы при анализе жизненного состояния учитывали только свежий сухостой.

Для оценки жизненного состояния древостоев рассчитывали индекс их поврежденности по формуле, предложенной А.С. Алексеевым [7]. Индекс поврежденности является интегральным показателем состояния, на основании которого можно сравнивать разные по составу древостои. Интегральные индексы поврежденности каждого из сосновых древостоев рассчитаны на основе доли участия в них деревьев разной степени поврежденности.

Для получения более точных результатов за основу расчета брали не число, а стволовой запас древесины деревьев разных классов повреждения [28]:

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

где I – индекс поврежденности древостоя, баллы; i – классы повреждения деревьев (от 0 до 4); 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 [7] 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 проведен сплошной переучет подроста. К подросту отнесены древесные растения высотой более 0.25 м с диаметром до 6 см [29]. Учитывали общее количество растений подроста по породам, их высотную структуру, состояние. Подрост подразделяли на здоровый, сомнительный, усыхающий и сухой. Жизненное состояние подроста определяли по В.А. Алексееву [28]. Количественную оценку жизненного состояния подроста находили по формуле:

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

где C – показатель жизненного состояния подроста в момент наблюдения; n_1, n_2, n_3 – число соответственно здоровых, ослабленных (сомнительных) и усыхающих особей подроста; N – общее количество подроста, включая сухостой. При $C = 100–80\%$ подрост считали здоровым, при 79–50% – ослабленным, при 49–20% – сильно ослабленным и при <20% – разрушенным.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Мониторинг изученных древостоев сосняков черничных в период с 1998 по 2018 гг. не выявил значительных изменений в составе древостоев, но показал изменение их таксационных показателей. Во всех сосняках происходит увеличение

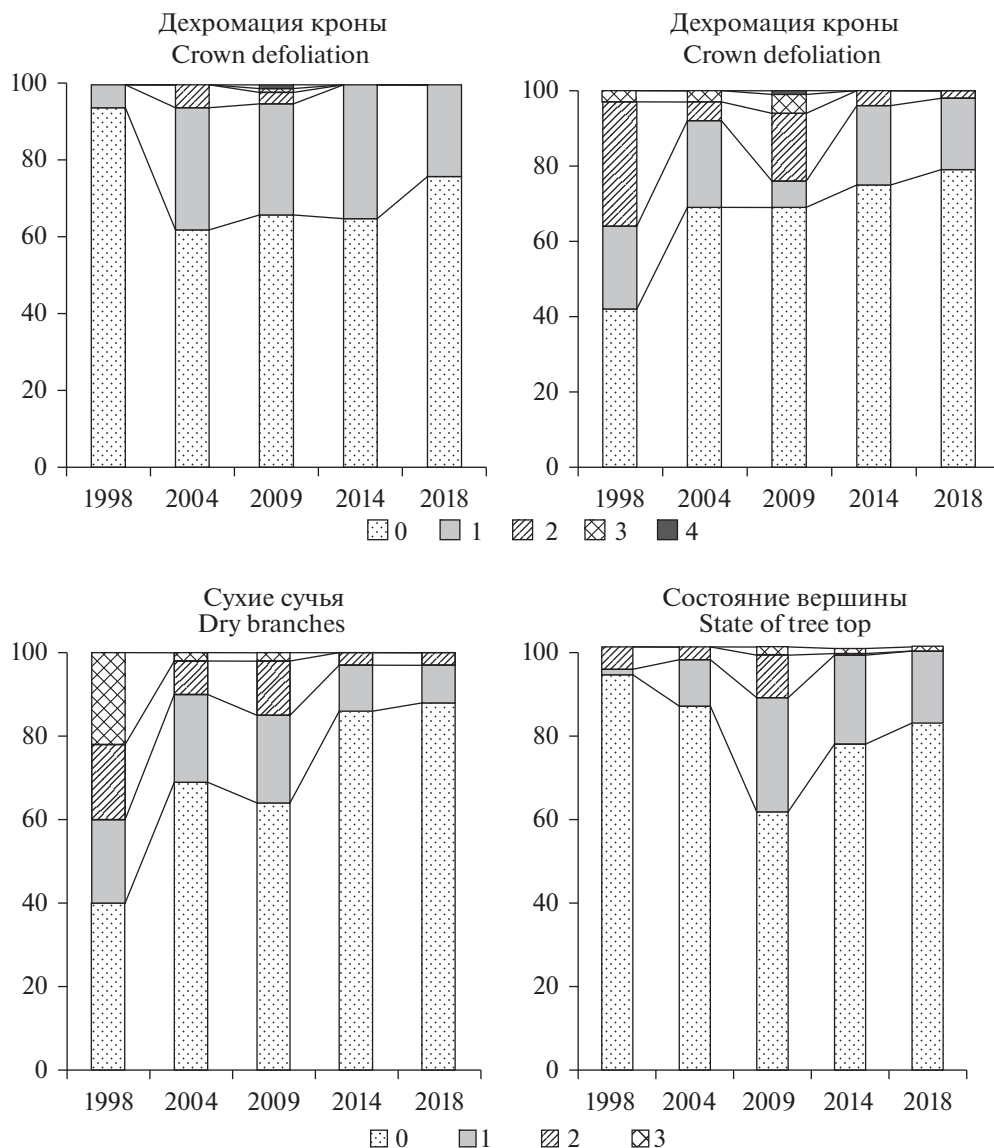


Рис. 1. Параметры состояния деревьев сосны в сосняках фонового района. Степень дехромации, дефолиации и доля сухих сучьев: 0 – < 10%, 1 – от 11 до 25%, 2 – от 26 до 60%, 3 – от 61 до 99%, 4 – 100% повреждений.

Состояние вершины дерева: 0 – живая, 1 – поврежденная, 2 – усыхающая, 3 – сухая.

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

Fig. 1. Parameters of Scots pine tree state in the pine forests of the reference area.

Degree of discoloration, defoliation and proportion of dry branches: 0 – < 10%, 1 – 11–25%, 2 – 26–60%, 3 – 61–99%, 4 – 100% damage.

State of tree top: 0 – living, 1 – damaged, 2 – drying out, 3 – dry.

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

среднего диаметра, высоты и запаса древесины (табл. 1).

Параметры древостоев фонового района

Дехромация. В сосняках черничных III–IV классов возраста, расположенных в фоновом районе на расстоянии 48–50 км от источника эмиссии в

древостоях доминируют деревья без признаков дехромации хвои (62–94%) (рис. 1). Наиболее высокая доля таких деревьев отмечена в начале исследования. В 2004, 2009 и 2014 гг. число деревьев без признаков дехромации несколько уменьшилось, но к 2018 г. увеличилось до 76%. Практически исчезли деревья со средней степенью дехромации. Во все годы наблюдений отсутствовали

деревья 3 и 4 класса дехромации, кроме 2009 г., когда они были представлены в незначительной доле — 1%.

Дефолиация кроны. Доля деревьев 0 класса дефолиации в древостоях сосняков на фоновой территории в 1998 г. в среднем составила 42%, к 2018 г. она увеличилась в 2 раза (рис. 1). За исследованный период в древостоях доля деревьев 1 класса дефолиации снизилась. Совсем немного было деревьев со средней степенью дефолиации кроны (2 класс). Деревья с сильной степенью дефолиации практически отсутствовали.

Состояние вершин. Доля деревьев сосны с неповрежденной вершиной за период с 1998 по 2018 гг. уменьшилась с 93 до 82% (рис. 1). Это произошло, видимо, за счет повреждения деревьев сосны энтомофагами. Достоверных данных об особенностях поражения ими деревьев мы к настоящему времени не имеем.

Доля сухих ветвей. В фоновом районе основная часть деревьев в сосняках не имела сухих сучьев в кроне: здоровые особи составляли 40–88%. Количество таких деревьев в период с 1998 по 2018 гг. в древостоях увеличилось в 2.2 раза.

Таким образом, как показали 20-летние наблюдения, в древостоях сосняков черничных и разнотравно-черничных фоновых районов преобладают особи с нормально развитой кроной. Изменения показателей состояния кроны свидетельствуют об улучшении состояния древостоев и, следовательно, продукционных процессов. Как видно из табл. 1, в исследуемых сосновых фитоценозах фоновой территории происходит интенсивное накопление стволовой древесины.

Параметры древостоев зоны загрязнения

Дехромация. В исследуемых сосняках этот показатель в среднем в 2014 и 2018 гг. по сравнению с 1998 г. ухудшился за счет увеличения почти в 2 раза доли деревьев со средней степенью дехромации крон (рис. 2). В 2018 г. количество деревьев без дехромации уменьшилось и составило 50%. С 1998 г. значительно (в 8 раз) уменьшилась доля деревьев с сильной степенью дехромации (26–60%), которая составила 2% в 2009, 2014 и 2018 гг. Следует отметить, что, несмотря на снижение объема атмосферных выбросов, в последние годы наблюдений (2014, 2018 гг.) в сосновых древостоях зоны аэротехногенного загрязнения было значительно больше деревьев 1 класса дехромации, чем в древостоях сосняков фоновой зоны. Так, доля участия деревьев этого класса дехромации в 2014 г. на загрязненной территории составила 50%, на фоновой — 35%. В 2018 г. — 48 и 24% соответственно.

Дефолиация кроны. В древостоях сосняков черничного ряда в 2018 г. по сравнению с 1998 г.

доля деревьев сосны без потерь хвои в среднем увеличилась в 2.8 раза и составила 85% (рис. 2). Участие деревьев со средней степенью дефолиации (11–26%) за рассматриваемый период уменьшилось в 3.5 раза и составило в 2018 г. 13%. Доля деревьев с сильно выраженной потерей хвои в 2018 г. по сравнению с 1998 г. существенно снизилась (до 2%). Эти изменения указывают на то, что по степени дефолиации крон состояние древостоев за исследуемый период улучшилось. В 2018 г. улучшились показатели, отражающие долю участия деревьев со средней и сильной степенью потери хвои.

Доля сухих ветвей. В сосняках зоны влияния выбросов доля деревьев без сухих сучьев в 2018 г. по сравнению с 1998 г. в среднем увеличилась в 4 раза и достигла 87% (рис. 2). Участие деревьев, имеющих 10–25% сухих сучьев, за этот период уменьшилось в 5 раз и составило 10%, кроме того, уменьшилась доля деревьев, имеющих 61–99% сухих сучьев.

Состояние вершин. Доля деревьев со здоровой вершиной в 2018 г. по сравнению с 1998 г. уменьшилась в 1.2 раза и составила в среднем 82%. Однако, по сравнению с 2009 г., доля деревьев с поврежденными верхушками уменьшилась в 2 раза, что может быть объяснено как увеличением видимых повреждений, так и переходом деревьев с повреждениями в класс сухостоя.

Виталитетная структура древостоев

Анализ виталитетных спектров господствующей части ценопопуляции (древостоя) выявляет не только естественные процессы ее формирования, развития и самоподдержания, но и отражает воздействие стрессовых факторов, в том числе аэротехногенного загрязнения [8].

Так, распределение деревьев по классам повреждения в древостоях сосняков на фоновых участках (48–50 км от источника загрязнения) изменилось в сторону увеличения доли здоровых деревьев. Если на начало исследований (1998 г.) доля здоровых деревьев составляла 43%, деревьев 1 класса повреждения — 35%, то в 2018 г. количество здоровых деревьев (0 класс) возросло до 79%, а доля слабоповрежденных уменьшилось до 17%. Только в 2014 г. было отмечено незначительное снижение доли здоровых и увеличение доли сухостоя деревьев.

Анализ распределения деревьев сосны по классам повреждения в зоне влияния выбросов целлюлозно-бумажного производства показывает, что состояние древостоев сосняков с 1998 по 2018 гг. улучшилось (рис. 3). По сравнению с 1998 г., в 2004, 2009, 2014 и 2018 гг. распределение деревьев по классам повреждения изменилось в сторону пре-

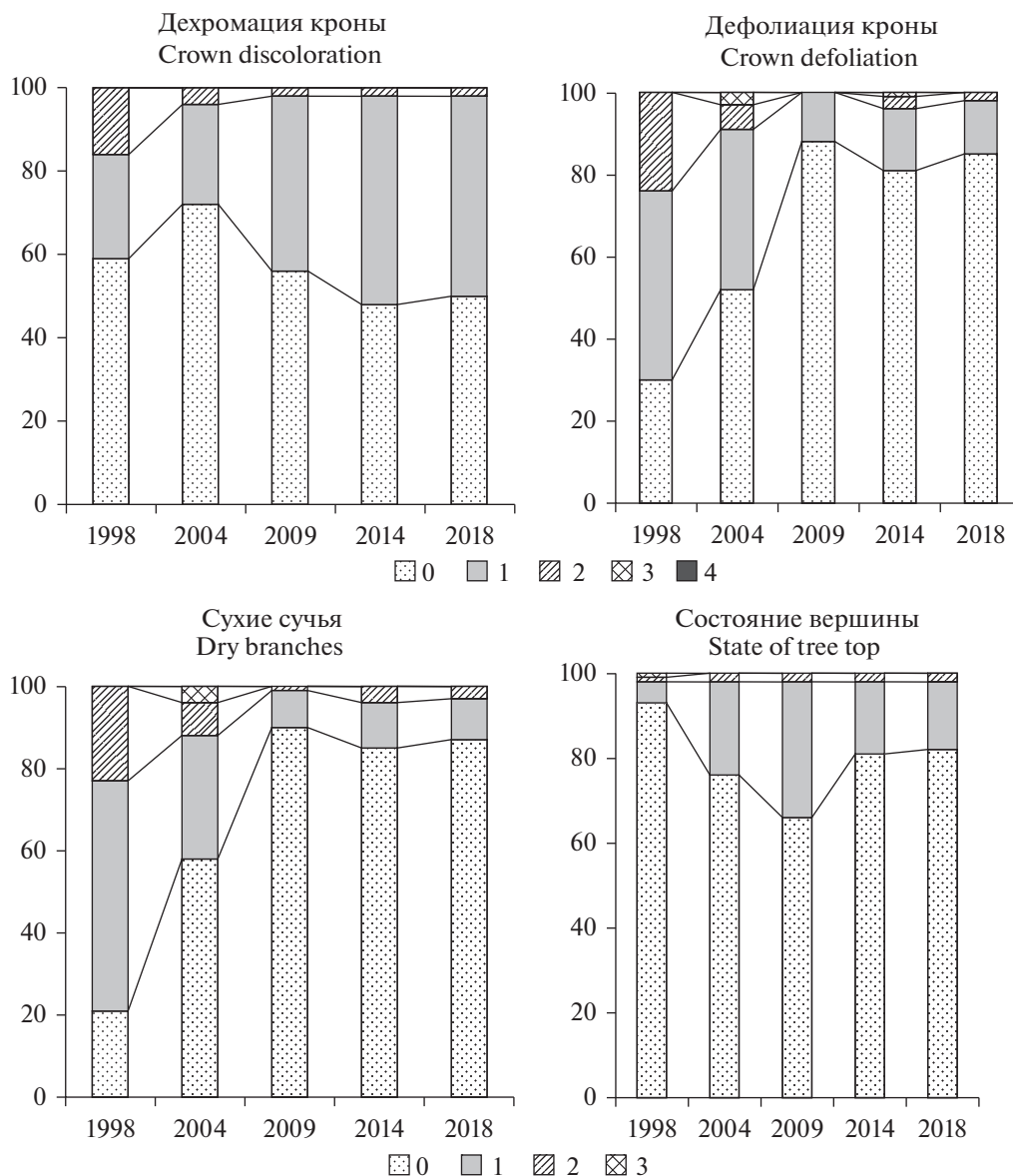


Рис. 2. Параметры состояния деревьев сосны в сосняках в зоне действия выбросов целлюлозно-бумажного производства ("Монди СЛПК").

Степень дехромации, дефолиации и доля сухих сучьев: 0 – менее 10%, 1 – от 11 до 25%, 2 – от 26 до 60%, 3 – от 61 до 99%, 4 – 100% повреждений.

Состояние вершины дерева: 0 – живая, 1 – поврежденная, 2 – усыхающая, 3 – сухая.

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

Fig. 2. Parameters of Scots pine tree state in the pine forests in the zone affected by emissions from pulp and paper mill (Mondi SLPK).

Degree of discoloration, defoliation and proportion of dry branches: 0 – < 10%, 1 – 11–25%, 2 – 26–60%, 3 – 61–99%, 4 – 100% damage.

State of tree top: 0 – living, 1 – damaged, 2 – drying out, 3 – dry.

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

обладания здоровых деревьев и уменьшения доли деревьев разной степени поврежденности, что указывает на улучшение состояния сосняков. За этот период произошло увеличение доли участия здоровых деревьев с 43% в 1998 г. до 71% в 2018 г. Однако усиленный отпад деревьев в 2014 г., за счет

снеголома, на ППП 3 и ППП 18 привел к некоторому ухудшению общего состояния древостоев в этих сосняках до слабоповрежденных (ослабленных). Древостои сосны на ППП 15 и 19 остались в категории здоровых. Положительные изменения экологической структуры древостоев сосняков

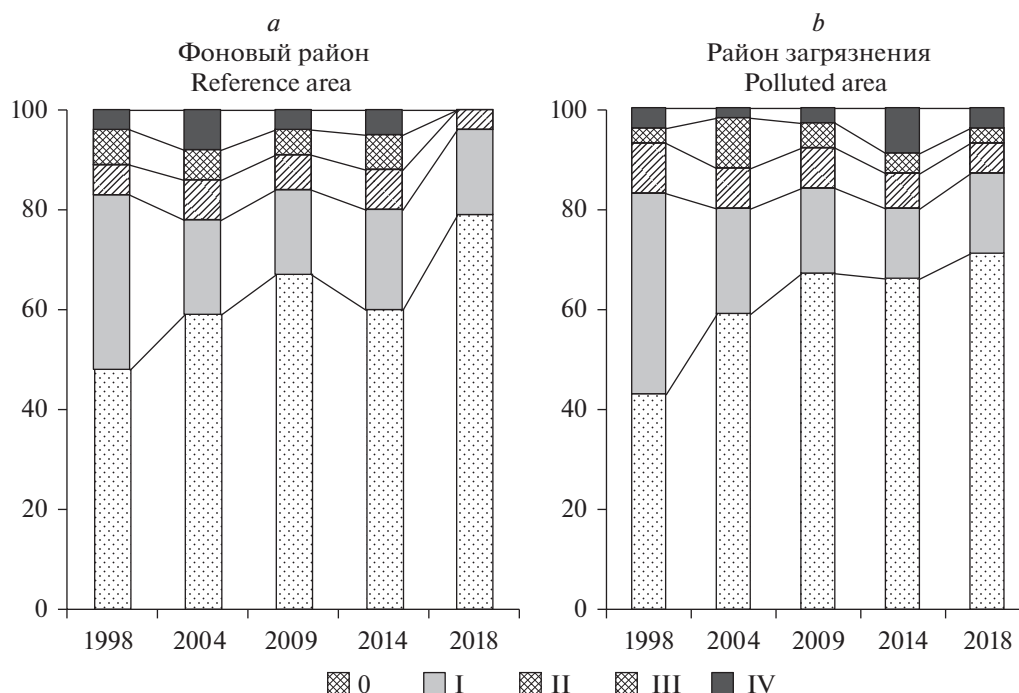


Рис. 3. Динамика виталитетной структуры сосновых древостоев фонового (а) и загрязненного (б) районов. Классы повреждения: 0 – <10%, I – от 11 до 25%, II – от 26 до 60%, III – от 61 до 99%, IV – 100%.

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

Fig. 3. Dynamics of Scots pine stands vitality structure in the reference (a) and polluted (b) areas.

Damage classes: 0 – <10%, 1 – 11–25%, 2 – 26–60%, 3 – 61–99%, 4 – 100%.

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

этой зоны следует объяснить трехкратным сокращением объемов атмосферных выбросов целлюлозно-бумажного комбината [16].

Индексы поврежденности. В табл. 2 приведена динамика индексов поврежденности древостоев исследуемых сосняков. Согласно А.С. Алексею [7], значение индекса ниже 0.5 характеризует древостой как здоровый. На фоновых участках величины индекса составили 0.27–0.49, что характеризует древостои этой зоны как здоровые. Незначительное ухудшение состояния древостоев в 2014, 2018 гг., по сравнению с 2009 г., обусловлено сломом вершин (снеголом) и усыханием тонкомерных угнетенных деревьев. Величины индекса поврежденности древостоев сосняков импактной зоны в 2018 г. по сравнению с 1998 г. значительно уменьшились, но увеличились по сравнению с 2009 г. В начале периода исследования в сосняках черничных отмечено уменьшение индекса поврежденности древостоев при удалении от комбината. Здоровыми были только древостои фоновых сосняков (ППП 23 и 24). Самым поврежденным был древостой на ППП 3, расположенной в импактной зоне на расстоянии 1.5 км от источника эмиссии. В сосняках зоны загрязнения (ППП 18, 15, 19), растущих в 6.5–11.2 км от комбината, из-

менения индекса поврежденности древостоев свидетельствуют об улучшении их состояния, что можно объяснить, прежде всего, уменьшением суммарных выбросов АО “Монди СЛПК” в 3 раза. За последние годы значительно (в 12 раз) уменьшились выбросы сероводорода и в 2 раза – меркаптанов. Отмечено сокращение эмиссии СО и специфических веществ. Многократное снижение выбросов привело к улучшению состояния крон деревьев и ассимиляционного аппарата и, как следствие, к увеличению доли здоровых деревьев в виталитетном спектре древостоев за счет перехода деревьев сосны из категории ослабленных в категорию здоровых. Следует отметить, что в исследуемых сосняках черничных зоны загрязнения так же, как в фоновых, происходит увеличение запаса древесины (табл. 1).

Таким образом, сравнительный анализ величин индекса поврежденности древостоев в 1998, 2004, 2009, 2014 и 2018 гг. показывает улучшение состояния древостоев сосновых фитоценозов, растущих в зоне воздействия выбросов целлюлозно-бумажного производства. В 1998 г. древостои сосняков в зоне действия выбросов АО “Монди СЛПК” характеризовались как средне- и сильно поврежденные, в 2004–2009 гг. как здоровые и

Таблица 2. Динамика индексов поврежденности* сосновых древостоев в фоновом районе и в условиях загрязнения выбросами целлюлозно-бумажного производства (Монди СЛПК)**Table 2.** Dynamics of Scots pine forest stands damage indexes* in the reference area and in the zone affected by emissions from pulp and paper mill (Mondi SLPK)

Год наблюдений Year of observation	№ ППП и расстояние от АО “Монди СЛПК”, км Sample plot number and distance from Mondi SLPK, km					
	Sample plot 3 (1.3 km)	Sample plot 19 (6.5 km)	Sample plot 8 (11.0 km)	Sample plot 15 (11.2 km)	Sample plot 23 (48.5 km)	Sample plot 24 (49.0 km)
1998 г.	1.2	0.72	0.83	0.89	0.42	0.41
2004 г.	0.79	0.29	0.33	0.77	0.38	0.43
2009 г.	0.69	0.10	0.32	0.33	0.37	0.30
2014 г.	0.64	0.11	0.39	0.39	0.49	0.27
2018 г.	0.57	0.27	0.41	0.37	0.45	0.32

Примечание: * индексы поврежденности древостоев рассчитаны по запасу древесины.

Note: * calculated on the standing crop basis.

слабо поврежденные, в 2014 и 2018 гг. как здоровые и слабо поврежденные. Обобщенная 20-летняя динамика индекса поврежденности показывает, что жизненное состояние древостоев сосняков черничного ряда на загрязненной территории, в связи с снижением выбросов, улучшилось. В древостоях фоновой территории состояние деревьев в период исследований оставалось практически на одном уровне.

Состояние подроста. Важным показателем устойчивого развития лесных фитоценозов является характер естественного лесовозобновления. Состояние подроста характеризует способность лесного сообщества к самовозобновлению и непрерывному развитию. Согласно имеющимся данным [29], подрост хвойных пород в сосняках формируется под пологом древостоя, создавая естественный фонд возобновления. Количество и жизненное состояние подроста под пологом древостоев служат индикаторами экологических и фитоценологических условий в лесных насаждениях.

Молодые деревья, находящиеся в стадии интенсивного роста, остро реагируют на изменение водного и питательного режима почв. В обмен веществ у них активно вовлекаются и химические соединения, находящиеся в окружающей среде даже недолгое время. Техногенное загрязнение является фактором во многом воздействующим на процессы лесовосстановления. Как было показано нами ранее [30], при длительном воздействии выбросов целлюлозно-бумажного производства на экосистему ухудшается общее состояние подроста, снижается интенсивность его роста, уменьшается плотность и жизнеспособность.

Под пологом исследуемых сосняков подрост состоит в основном из ели и березы, в небольшом

количестве встречаются сосна и осина (рис. 4). В сосняке разнотравном (ППП 3), расположенном в 1.3 км от СЛПК, обнаружен только подрост ели в количестве 116 экз. га⁻¹. Наибольшее количество подроста (1050 экз. га⁻¹) среди сосняков, расположенных на загрязненной территории, выявлено в сосняке черничном влажном (ППП 19), где в его составе также преобладает ель. В сосняках черничных свежих (ППП 15 и 18) количество подроста ели меньше, чем на ППП 19, и составляет 242 и 13 экз. га⁻¹ соответственно. Подрост сосны в исследуемых сосняках присутствует в незначительном количестве или отсутствует. В сосняках на фоновой территории количество подроста варьирует от 640 до 2167 экз. га⁻¹. В условиях загрязнения, по сравнению с фоновой территорией, происходит снижение численности подроста.

Распределение подроста ели по высоте показало, что значительная его часть приходится на особи крупной (более 1.5 м) категории (от 76 до 790 экз. га⁻¹), за исключением ППП 18, где данная категория подроста отсутствует (рис. 5). На ППП 19 большую часть подроста составляют особи средней категории высоты (0.6–1.5 м). В сосняках фоновой территории в 2014 г. отмечалось отсутствие мелкого подроста ели. В 2018 г. на ППП 23 и ППП 24 из самосева ель вышла в состояние подроста до 0.5 м в количестве 195 и 381 экз. га⁻¹ соответственно. Кроме количественных показателей определяли качественные показатели. В табл. 3 представлено распределение подроста сосны и ели по категориям жизненного состояния на фоновой и загрязненной территориях. Как уже отмечалось выше, в исследованных сосняках

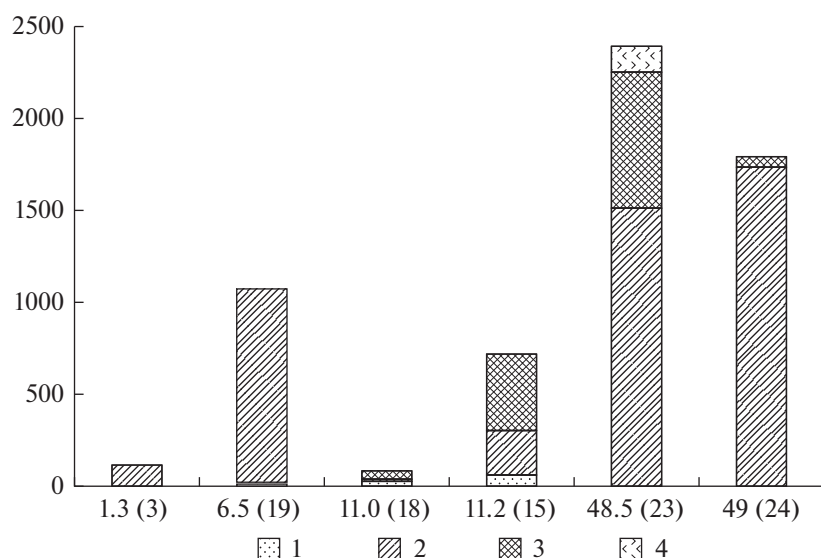


Рис. 4. Состав подраста в сосновых фитоценозах в зависимости от удаленности от АО “Монди СЛПК” (2018 г.): 1 – *Pinus sylvestris*, 2 – *Picea obovata*, 3 – *Populus tremula*, 4 – *Betula* spp.

По горизонтали – расстояние от АО “Монди СЛПК”, км (№ ППП); по вертикали – количество подраста, экз./га.

Fig. 4. Undergrowth composition in Scots pine forests, in relation to the distance from Mondi Syktyvkar (2018): 1 – *Pinus sylvestris*, 2 – *Picea obovata*, 3 – *Populus tremula*, 4 – *Betula* spp.

X-axis – distance from Mondi Syktyvkar, km (№ sample plots); y-axis – number of undergrowth.

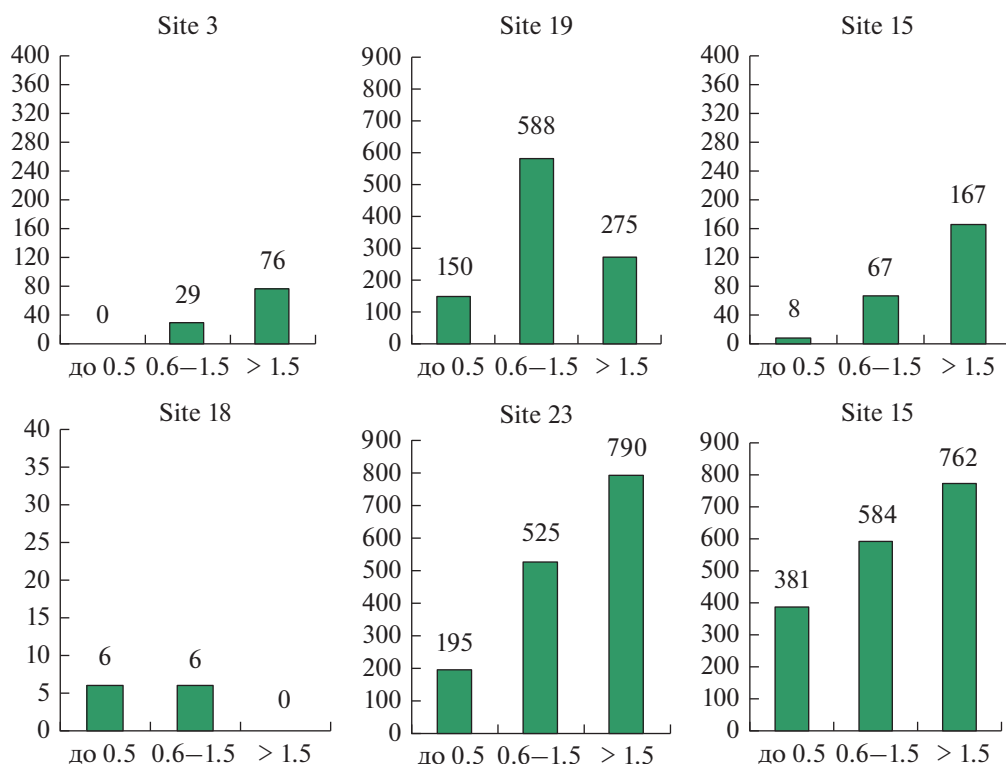


Рис. 5. Распределение подраста ели по грациям высоты в сосновых фитоценозах на загрязненной (ППП 3, 19, 15, 18) и фоновой территориях (ППП 23, 24) (2018 г.).

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

Fig. 5. Height distribution of Siberian spruce undergrowth in Scots pine forests in polluted (sample plot 3, 19, 15, 18) and reference areas (sample plot 23, 24) (2018).

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

Таблица 3. Распределение хвойного подроста (сосна/ель) по категориям состояния в сосновых фитоценозах, экз./га
Table 3. Vitality status distribution of coniferous undergrowth (Scots pine/ Siberian spruce) in pine phytocoenoses, ind./ha

Расстояние от Монди СЛПК, км (номер ППП) Distance from Mondi SLPK, km (Sample plot number)	Год наблюдений Year of observation	Всего Total	Жизненное состояние Vitality status			
			здоровый healthy	сомнительный questionable	усыхающий drying	сухой dry
Сосновые леса в зоне действия выбросов АО “Монди СЛПК” Pine forests in the zone affected by Mondi SLPK emission						
3 (1.3)	1998	20/475	10/360	5/50	5/50	0/25
	2014	0/433	0/180	0/173	0/80	0/0
	2018	0/116	0/67	0/29	0/10	0/10
19 (6.5)	1998	—*	—	—	—	—
	2014	50/650	0/550	50/100	0/0	0/0
	2018	13/1051	13/688	0/200	0/125	0/38
18 (11.0)	1998	280/20	0/20	50/0	50/0	180/0
	2014	17/84	0/50	0/0	17/17	0/17
	2018	26/13	13/13	13/0	0/0	0/0
15 (11.2)	1998	320/100	120/50	12/12	13/13	175/25
	2014	0/341	0/158	0/108	0/75	0/0
	2018	60/242	0/192	0/25	0/25	60/0
Сосновые леса фонового района Pine forests in the reference area						
23 (48)	2014	0/640	0/520	0/120	0/0	0/0
	2018	0/1510	0/1445	0/65	0/0	0/0
24 (49)	1998	10/1450	10/1260	0/100	0/90	0/0
	2014	0/2167	0/1767	0/367	0/33	0/0
	2018	0/1733	0/1600	0/121	0/6	0/6

Примечание: * Прочерк означает "нет данных".

Note: * dash — no data.

черничного ряда подрост сосны слабо развит, его количество с 1998 г. постепенно уменьшается. Отмечается большая вариабельность количества подроста ели и его распределения по категориям состояния на отдельных участках. По сравнению с годом начала исследований (1998 г.), общее количество подроста ели в фоновом районе (ППП 23 и ППП 24) увеличилось. В условиях загрязнения на наиболее близком расстоянии от источника выбросов (ППП 3) отмечено уменьшение числа особей подроста от 475 до 116 экз. га⁻¹. На ППП

18 и 15 количество подроста также уменьшилось, но четкой динамики не выявлено. В сосняке черничном влажном (ППП 19) отмечается интенсивный выход ели из самосева в подрост, но вместе с тем происходит ухудшение его состояния — увеличивается количество сомнительных, усыхающих и сухих экземпляров.

Значения индексов жизненного состояния (С) подроста хвойных древесных растений в сосняках фоновой территории ППП 23 и ППП 24 в 2018 г. составили 99 и 97%, что характеризует состояние

Таблица 4. Динамика индекса жизненного состояния (%) подроста ели в сосняках в фоновом районе и в условиях загрязнения выбросами целлюлозно-бумажного производства (“Монди СЛПК”)

Table 4. Dynamics of spruce undergrowth vitality status index (%) in Scots pine forests in the reference area and in the zone affected by emissions from pulp and paper mill (Mondi SLPK)

Год наблюдений Year of observation	Sample plot 3 (1.3 km)	Sample plot 19 (6.5 km)	Sample plot 18 (11.0 km)	Sample plot 15 (11.2 km)	Sample plot 23 (48 km)	Sample plot 24 (49 km)
1998	85	—	100	63	—	93
2004	—	74	98	83	—	99
2009	—	100	100	83	100	99
2014	75	95	65	75	94	94
2018	78	82	100	87	99	97

Примечание: * Прочерк означает “нет данных”.

Note: * dash — no data.

подроста как “здоровое”. На загрязненных участках ППП 15, ППП 18, ППП 19 при величинах индекса жизненного состояния от 63 до 100% подрост ели характеризуется как здоровый, только в сосняке разнотравном (ППП 3) как ослабленный (табл. 4).

Таким образом, для исследуемых сосняков черничного ряда как на загрязненной территории, так и в фоновом районе характерен слабый лесовозобновительный процесс. Подрост представлен в основном елью при участии березы, реже сосны. Подрост хвойных характеризуется разновысотной структурой. Выявлено, что в 2018 г. количество подроста ели в сосняках черничных в зоне действия выбросов в среднем уменьшилось в 1.6 раза по сравнению с 1998 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мониторинг состава и состояния древесных растений в сосновых лесах черничного типа в условиях Республики Коми на фоновой территории и в зоне воздействия выбросов целлюлозно-бумажного производства (АО “Монди СЛПК”) показал, что с 1998 по 2018 гг. произошли небольшие изменения в составе древостоев. На исследованной территории древесный ярус формирует в основном сосна обыкновенная, при небольшом участии ели сибирской, березы пушистой и повислой, осины. Снижение техногенных выбросов целлюлозно-бумажного производства за период исследований сказалось на состоянии древесных растений в зоне загрязнения. В период с 1998 по 2018 гг. сохранялась слабая дехромация и дефолиация хвои сосны, продолжает увеличиваться доля участия в древостоях деревьев сосны с поврежденными вершинами. Динамика виталитетной

структуры древостоев за этот период отражает увеличение доли участия в их составе здоровых деревьев с одновременным сокращением доли слабо- и сильно поврежденных. Сравнительный анализ индексов поврежденности древостоев в 1998, 2004, 2019, 2014 и 2018 гг. показывает, что в сосновых фитоценозах на загрязненной аэротехногенными выбросами территории жизненное состояние деревьев в период с 1998 по 2018 гг. улучшилось, а на фоновой территории осталось на том же уровне. Древостои сосняков зоны аэротехногенного действия в 1998 г. по индикационным признакам были охарактеризованы как слабо- и среднеповрежденные. В 2004–2009 гг. как здоровые и слабоповрежденные, в 2014 и 2018 гг. они отнесены к здоровым и слабоповрежденным. Древостои сосняков черничных в фоновом районе в период наблюдений с 1998 по 2018 гг. по индикационным показателям характеризуются как здоровые.

Подрост под пологом сосняков представлен елью сибирской, сосной обыкновенной и березой, при доминировании ели. Для фитоценозов как загрязненной территории, так и фоновой района характерен слабый лесовозобновительный процесс. Подрост хвойных характеризуется разновысотной структурой. Выявлено, что в 2018 г. по сравнению с 1998 г. количество подроста ели в сосняках черничных в зоне действия выбросов в среднем уменьшилось в 1.6 раза. При этом количество здорового подроста ели изменилось незначительно, в целом его состояние улучшилось. Согласно индексу состояния, подрост хвойных древесных растений в зоне загрязнения характеризуется как здоровый, лишь в сосняке на расстоянии 1.3 км он ослаблен.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках бюджетной темы НИР “Пространственно-временная динамика структуры и продуктивности фитоценозов лесных и болотных экосистем на европейском Северо-Востоке России” (AAAA-A17_117122090014-8) и хозяйственной темы “Оценка долговременного влияния АО “Монди СЛПК” на биологическое разнообразие в районе производства” (договор № 45-2018 от 24 апреля 2018 г.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ярмишко В.Т. 1997. Сосна обыкновенная и атмосферное загрязнение на европейском Севере. СПб. 210 с.
2. Тарханов С.Н., Прожерина Н.А., Коновалов В.Н. 2004. Лесные экосистемы бассейна Северной Двины в условиях атмосферного загрязнения: диагностика состояния. Екатеринбург. 333 с.
3. Васфилов С.П. 2005. Влияние загрязнения воздуха на сосну обыкновенную. Екатеринбург. 212 с.
4. Цветков В.Ф., Цветков И.В. 2003. Лес в условиях аэротехногенного загрязнения. Архангельск. 354 с.
5. Булгаков Н.Г. 2002. Индикация состояния природных экосистем и нормирование факторов окружающей среды: обзор существующих подходов. — Успехи современной биологии. 122 (2): 115–135.
6. Сухих В.И. 1995. Мониторинг лесов — состояние и проблемы. — В кн.: Проблемы мониторинга и моделирования динамики лесных экосистем. М. С. 5–23.
7. Алексеев А.С. 1997. Мониторинг лесных экосистем. С-Пб. 116 с.
8. Динамика лесных сообществ Северо-Запада России. 2009. В.Т. Ярмишко, И.Ю. Баккал, О.В. Борисова, В.В. Горшков, П.Н. Катютин, И.В. Лянгузова, Е.А. Мазная, Н.И. Ставрова, М.А. Ярмишко. — СПб.: ВВМ. 276 с.
9. Леса Республики Коми. 1999. М. 332 с.
10. Лесные экосистемы и атмосферное загрязнение. 1990. Л.: 200 с.
11. 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.
12. Гудериан Р. 1979. Загрязнение воздушной среды. М. 200 с.
13. Илькун Г.М. 1978. Загрязнение атмосферы и растения. Киев. 249 с.
14. Торлопова Н.В., Робакидзе Е.А. 2003. Влияние поллютантов на хвойные фитоценозы (на примере Сыктывкарского лесопромышленного комплекса). Екатеринбург. 147 с.
15. Тужилкина В.В., Ладанова Н.В., Плюснина С.Н. 1998. Влияние техногенного загрязнения на фотосинтетический аппарат сосны. — Экология. 2: 89–93.
16. Экологические отчеты 2006, 2009–2010, 2013–2015. Mondi Сыктывкарский ЛПК. <https://www.mondigroup.com/en/sustainability/sustainability-reports-and-publications/>
17. 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. https://www.icp-forests.org/pdf/manual/1994/ICPForests_Manual_1994.pdf
18. 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.net/page/icp-forests-manual>
19. 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.
20. Kandler O. Air pollution and forest decline in Central Europe. 1993. — 15th Int. Bot. Cong.: Abstr. Yokogama, P.58.
21. 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.
22. Захаров В.К. 1967. Лесная таксация. М. 406 с.
23. ОСТ 56–69–83. Площади пробные лесоустроительные. Методы закладки. 1983. М. 60 с.
24. Лесотаксационный справочник для Северо-Востока европейской части СССР. 1986. Архангельск. 358 с.
25. Бобкова К.С. 1993. Биологический круговорот азота и зольных элементов в сосновых биогеоценозах. — В кн.: Эколого-физиологические основы продуктивности сосновых лесов европейского Севера. Сыктывкар: Коми НЦ РАН. С.127–148.
26. Яблоков А.В. 1987. Популяционная биология. М. 303 с.
27. Алексеев А.С. 1990. Анализ экологической структуры популяции *Picea abies* (Pinaceae) в условиях атмосферного загрязнения. — Бот. журн. 75(9): 1277–1284. http://arch.botjournal.ru/?t=issues&id=19900909&rid=pdf_0005158
28. Алексеев В.А. 1989. Диагностика жизненного состояния деревьев и древостоев. — Лесоведение. 4: 51–57.
29. Побединский А.В. 1966. Изучение лесовосстановительных процессов. М.: 64 с.
30. Робакидзе Е.А., Торлопова Н.В. 2014. Состояние подроста ели под пологом еловых древостоев в черничных типах леса в условиях аэротехногенного загрязнения. — Вестник Института биологии. 2: 20–23.

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

E. A. Robakidze^{a,*}, N. V. Torlopova^a, K. S. Bobkova^a, S. I. Naimushina^a

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

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

Abstract—The results of the observation of the effect of aerial pollution from pulp and paper mill on the viability of tree stands and undergrowth in the green moss pine forests located at different distances of the source of emission are given. The studies were carried out in 1998–2003 around Mondi Syktyvkar Timber Industry Complex (Mondi SLPK), which has been operating since 1969. Over the past 20 years, vitality of woody plants in pine forests improved due to a decrease in aerial emissions. In 1998, according to vitality indicators, pine forest stands in the area around Mondi SLPK were considered as slightly and moderately damaged, in 2004 – as slightly damaged, in 2009 – as healthy. In 2014 and 2018 they were considered as healthy and slightly damaged. The pine stands of the reference area during the observations of 1998–2018 were considered as healthy. In the polluted area, the reforestation of pine forests is unsatisfactory. Coniferous undergrowth density is 39–1064 ind./ha. In 2018, as compared to 1998, the spruce undergrowth density in blueberry pine forests of the contaminated zone decreased by an average of 1.6 times. At the same time, the number of healthy undergrowth remained almost unchanged, while its condition improved.

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

REFERENCES

1. Yarmishko V.T. 1997. [Scots pine and atmospheric pollution in the European North]. St. Petersburg. 210 p. (In Russian)
2. Tarkhanov S.N., Prozherina N.A., Konovalov V.N. 2004. [Forest ecosystems of the Northern Dvina River Basin under atmospheric pollution: diagnostics of the status]. Ekaterinburg. 333 p. (In Russian)
3. Vasfilov S.P. 2005. [Effect of air pollution on Scots pine]. Ekaterinburg. 212 p. (In Russian)
4. Tsvetkov V.F., Tsvetkov I.V. 2003. [Forest under air pollution]. Arkhangelsk. 354 p. (In Russian)
5. Bulgakov N.G. 2002. [Indication of the natural ecosystems status and standardization of environmental factors: a review of the existing approaches]. — *Uspekhi sovremennoy biologii*. 122(2): 115–135. (In Russian)
6. Sukhikh V.I. 1995. [Forest monitoring – state and challenges]. — In: [Problems of monitoring and modelling of forest ecosystems dynamics]. Moscow. P. 5–23. (In Russian)
7. Alekseev A.S. 1997. [Monitoring of forest ecosystems]. St. Petersburg. 116 p. (In Russian)
8. Yarmishko V.T., Bakkal I.Y., 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]. — St. Petersburg. 276 p. (In Russian)
9. [Forests of the Komi Republic]. 1999. Moscow. 332 p. (In Russian)
10. [Forest ecosystems and atmospheric pollution]. 1990. Leningrad. 200 p. (In Russian)
11. 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)
12. Guderian R. 1979. [Air pollution]. Moscow. 200 p. (In Russian)
13. Ilkun G.M. 1978. [Air pollution and plants]. Kyiv. 249 p. (In Russian)
14. Torlopova 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)
15. Tuzhilkina V.V., Ladanova N.V., Plyusnina S.N. 1998. [The effect of technogenic pollution on the photosynthetic apparatus of pine]. — *Ekologiya*. 2: 89–93. (In Russian)
16. *Sustainability reports*. 2006, 2009–2010, 2013–2015. Mondi Syktyvkar LPK. (In Russian)
<https://www.mondigroup.com/en/sustainability/sustainability-reports-and-publications/>
17. *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.
https://www.icp-forests.org/pdf/manual/1994/ICPForests_Manual_1994.pdf
18. *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.net/page/icp-forests-manual>
19. *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. (In French)
20. Kandler O. 1993. Air pollution and forest decline in Central Europe.— 15th Int. Bot. Cong.: Abstr. Yokogama. P. 58.

21. *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.
22. *Zakharov V.K.* 1967. [Forest mensuration] Moscow. 406 p. (In Russian)
23. *Industry Standard* 56-69-83. [Forest inventory plots. Methods for establishing]. 1983. Moscow. 60 p. (In Russian)
24. [Forest mensuration manual for the Northeast of the European part of the USSR]. 1986. Arkhangelsk. 358 p. (In Russian)
25. *Bobkova K.S.* 1993. [The biological cycle of nitrogen and ash constituents in pine biogeocenoses]. — In: [Environmental and physiological foundation for pine forest productivity]. Syktyvkar. P.127–148. (In Russian)
26. *Yablokov A.V.* 1987. [Population biology]. Moscow. 303 p. (In Russian).
27. *Alekseev A.S.* 1990. Analysis of the ecological structure of the *Picea abies* (Pinaceae) population growing under atmospheric pollution. — *Botanichesky zhurnal*. 75(9): 1277–1284.
http://arch.botjournal.ru/?t=issues&id=19900909&rid=pdf_0005158 (In Russian)
28. *Alekseev V.A.* 1989. [Determination of the trees and forest stands vitality]. — *Lesovedenie*. 4: 51–57. (In Russian)
29. *Pobedinsky A.V.* 1966. [Studying forest regeneration processes]. Moscow. 64 p. (In Russian).
30. *Robakidze E.A., Torlopova N.V.* 2014. [The status of spruce undergrowth beneath the canopy of spruce stands in bilberry forests affected by aerial pollution]. — *Vestnik Instituta biologii Komi NC UrO RAN*. 2: .20–23. (In Russian)