

Научная статья  
УДК 630.182  
EDN RXJNWE  
DOI 10.24419/LHI.2304-3083.2025.4.03

## Оценка влияния выпадений тяжёлых металлов на состояние сосновых насаждений Подмоскovie

**Александр Александрович Мартынюк<sup>1</sup>**  
доктор сельскохозяйственных наук, академик РАН

**Татьяна Владимировна Рыкова<sup>2</sup>**  
кандидат сельскохозяйственных наук

**Владимир Юрьевич Рыков<sup>3</sup>**

**Аннотация.** Представлены методические подходы к анализу влияния на состояние лесных насаждений техногенного загрязнения окружающей среды тяжёлыми металлами с использованием статистического анализа корреляции между содержанием загрязнителей в снежном покрове и индексом состояния древостоев. Выполнена оценка воздействия промышленных выбросов тяжёлых металлов на сосновые насаждения разных групп возраста. По результатам полевого эксперимента приведены данные о влиянии контролируемых нагрузок цинка на различные компоненты насаждений и значения допустимых уровней выпадений этого элемента для сосновых молодняков. По сопоставлению данных о фактических уровнях выпадений и величине допустимых нагрузок сделан вывод о незначительном влиянии загрязнения тяжёлыми металлами на состояние сосновых лесов в районе исследований.

**Ключевые слова:** сосновые насаждения, промышленные выбросы, техногенные нагрузки (выпадения), полевой эксперимент, цинк, компоненты экосистемы, допустимая техногенная нагрузка.

**Для цитирования:** Мартынюк А.А., Рыкова Т.В., Рыков В.Ю. Оценка влияния выпадений тяжёлых металлов на состояние сосновых насаждений Подмоскovie. – Текст : электронный // Лесохозяйственная информация. 2025. № 4. С. 50–60. DOI 10.24419/LHI.2304-3083.2025.4.03. <https://elibrary.ru/rxjnw>.

<sup>1</sup> Всероссийский научно-исследовательский институт лесоводства и механизации лесного хозяйства, научный руководитель ФБУ ВНИИЛМ (Пушкино, Московская обл., Российская Федерация), [info@vniilm.ru](mailto:info@vniilm.ru)

<sup>2</sup> Всероссийский научно-исследовательский институт лесоводства и механизации лесного хозяйства, ведущий научный сотрудник (Пушкино, Московская обл., Российская Федерация), [rykova@vniilm.ru](mailto:rykova@vniilm.ru)

<sup>3</sup> Всероссийский научно-исследовательский институт лесоводства и механизации лесного хозяйства, аспирант, инженер 1-й категории (Пушкино, Московская обл., Российская Федерация), [spikervr@gmail.com](mailto:spikervr@gmail.com)

Original article

EDN RXJNWE

DOI 10.24419/LHI.2304-3083.2025.4.03

## Assessment of the Impact of Heavy Metals Fallout on Condition of Pine Forests in the Moscow region

**Alexander A. Martynuik<sup>1</sup>**

*Doctor of Agricultural Sciences,  
Academician of the Russian Academy of Sciences*

**Tatyana V. Rykova<sup>2</sup>**

*Candidate of Agricultural Sciences*

**Vladimir Y. Rykov<sup>3</sup>**

**Abstract.** The paper presents methodological approaches to assessing the impact of anthropogenic pollution of the environment with heavy metals on the condition of forest plantations using statistical analysis of the correlation between the content of pollutants in the snow cover and the index of the condition of tree stands. The impact of industrial emissions of heavy metals on pine plantations of different age groups has been evaluated. Based on the results of a field experiment, the paper presents data on the effect of controlled zinc loads on various components of plantations and the permissible levels of zinc deposition for pine young forests. Based on the comparison of data on actual metal deposition levels and permissible loads, it was concluded that heavy metal pollution had no significant impact on the condition of pine forests in the study area.

**For citation:** Martynuik A., Rykova T., Rykov V. Assessment of the Impact of Heavy Metals Fallout on the Condition of Pine Forests in the Moscow region. – Text: electronic // Forestry Information. 2025. № 4. P.C. 50–60. DOI 10.24419/LHI.2304-3083.2025.4.03. <https://elibrary.ru/rxjnw>.

<sup>1</sup> All-Russian Scientific Research Institute for Silviculture and Mechanization of Forestry, VNIILM Research Leader (Pushkino, Moscow region, Russian Federation), [info@vniilm.ru](mailto:info@vniilm.ru)

<sup>2</sup> All-Russian Scientific Research Institute for Silviculture and Mechanization of Forestry, Leading Researcher (Pushkino, Moscow region, Russian Federation), [rykova@vniilm.ru](mailto:rykova@vniilm.ru)

<sup>3</sup> All-Russian Scientific Research Institute for Silviculture and Mechanization of Forestry, Postgraduate, 1<sup>st</sup> Category Engineer (Pushkino, Moscow region, Russian Federation), [spikervr@gmail.com](mailto:spikervr@gmail.com)

## Введение

Сокращение объёмов фитотоксичных веществ до настоящего времени является важным условием обеспечения жизнедеятельности и сохранения лесов в зонах воздействия промышленных выбросов, в том числе при загрязнении окружающей среды тяжёлыми металлами (ТМ). Прямое и опосредованное влияние различных техногенных факторов отмечается на более чем 75 млн га земель, вовлечённых в хозяйственный оборот, а зоны с загрязнёнными почвами только вокруг промышленных комплексов занимают 18 млн га [1, 2]. Согласно данным Росгидромета, в 2011–2020 гг. к опасной и умеренно опасной категории загрязнения почв ТМ относится 14% обследованных территорий, включающих населённые пункты, одно- и пятикилометровые зоны вокруг источников загрязнения. Приоритетными металлами-загрязнителями техногенного происхождения являются медь (Cu), свинец (Pb), кадмий (Cd), цинк (Zn), кобальт (Co), никель (Ni), хром (Cr) [3]. При этом значительная часть техногенно загрязнённых земель покрыта лесными насаждениями, которые используются не только для получения древесины, но и выполняют очень важные для промышленных регионов средообразующие и санитарно-гигиенические функции. Поступающие в окружающую среду тяжёлые металлы, характеризуясь поливалентностью, хорошей адсорбцией почвами, возможностью образования плохорастворимых соединений с фосфатами, гидроксидами и т.п., способны постепенно накапливаться в компонентах природных экосистем и формировать техногенные аномалии в промышленно развитых регионах страны. Это обуславливает изменение состояния лесной растительности, произрастающей на таких территориях, представляя потенциальную угрозу состоянию и продуктивности лесов, качеству недревесных лесных ресурсов [4–6].

Несмотря на то что проблеме взаимодействия лесных экосистем с промышленными выбросами тяжёлых металлов посвящены многочисленные научные исследования [5–10], остаются не до конца изученными вопросы реакции лесных

насаждений на многоэлементное загрязнение среды ТМ техногенного происхождения, а также подходы к определению допустимых значений воздействия. Это позволит установить истинные причины ухудшения состояния лесов и создаст основу для корректировки системы мероприятий как первоочередной меры по сокращению ущерба лесам от техногенного загрязнения.

Цель исследований – оценка влияния промышленных выбросов тяжёлых металлов на состояние сосновых насаждений в Подмосковье в условиях полевого эксперимента с обоснованием допустимых уровней выпадений цинка как приоритетного загрязнителя различных компонентов сосновых экосистем.

## Объекты и методика исследований

Исследования проводили в течение семи лет на Воскресенском научно-исследовательском стационаре ВНИИЛМ в сосновых насаждениях Виноградовского и Куровского лесничеств (Воскресенский и, частично, Орехово-Зуевский районы Московской обл.), относящихся к зоне хвойно-широколиственных лесов, к сосновым заболоченным лесам Мещерской низменности. Загрязнение окружающей среды и лесов на территории стационара формируется за счёт выбросов значительного числа промышленных источников, среди которых наибольшее воздействие оказывают предприятия Воскресенска (производство минеральных фосфорных удобрений, цемента, асбоцементных строительных материалов, машиностроения), непосредственно влияющие на лесные экосистемы [4, 7].

Опубликованные научные результаты, полученные в ходе исследований на территории стационара [4, 7, 9–12], свидетельствуют о подщелачивании природной среды, особенно выраженном в северной, южной и юго-восточной частях района, подверженных максимальному воздействию пылевых выбросов промышленных предприятий и, прежде всего, цементных производств. По уровню средних концентраций в растворимой части снеговых

вод тяжёлые металлы образуют следующий ряд:  $Zn > Ni > Co > Cu = Cr > Cd$ ; по среднему содержанию ТМ в подстилке сосновых насаждений –  $Zn > Pb > Cu > Ni > Co > Cd$ ; по концентрациям подвижных форм в почве –  $Zn > Pb > Cu > Ni > Co > Cd$ . То есть для всех основных компонентов окружающей среды – снега, лесной подстилки и почв – из перечня изучаемых тяжёлых металлов цинк является основным загрязняющим веществом, что и определило выбор его как приоритетного загрязнителя для проведения полевых экспериментов с контролируемым уровнем выпадений по отработке методик обоснования допустимого воздействия на леса.

В процессе исследований изучалось состояние сосновых древостоев, произрастающих на разном удалении от источников выбросов, а также проводился полевой эксперимент по обоснованию допустимого уровня выпадений цинка как одного из компонентов промышленных выбросов для сосняков стационара.

Для исследований использовали 26 постоянных пробных площадей (ППП), заложенных на территории Воскресенского стационара ВНИИЛМ. Оценка состояния древостоев сосны на ППП проводили в конце вегетационного периода (октябрь) по шкале, приведённой в методике ВНИИЛМ (Временная методика по учёту сосновых насаждений, подверженных влиянию промышленных выбросов) [13] с определением охвоенности побегов и продолжительности жизни хвои (3–4-я мутовка, побеги второго порядка). Степень ослабления насаждений характеризовалась средним индексом состояния, вычисленным как средневзвешенное значение состояния отдельных деревьев [4, 10].

Уровень выпадений тяжёлых металлов на насаждения пробных площадей определён на основе результатов изучения химического состава снеговых вод [7, 9]. Использование снежного покрова, накапливающего выбрасываемые в воздух вредные вещества на протяжении зимнего периода, позволяет, как свидетельствуют данные научных исследований [4, 7, 9–11], оценить уровень и пространственное загрязнение лесных территорий. Методика исследований включала отбор

смешанных проб снега на открытых местоположениях вблизи пробных площадей и проведение снегомерной съёмки для определения запасов влаги в снеге. Химический анализ проб снега проводился по методикам, принятым для водных объектов. Техногенную нагрузку ТМ вычисляли путём определения их концентрации в снеговой воде и её запасов в местах отбора проб.

В ходе планирования полевого эксперимента по обоснованию допустимого уровня выпадений цинка для сосновых насаждений мы исходили из того, что при нормировании воздействия техногенного загрязнения на леса использование приёмов санитарно-гигиенического подхода не всегда позволяет получать корректные значения допустимого уровня загрязнения природных сред и компонентов лесных экосистем. В связи с этим рекомендован новый подход, названный экологическим, предусматривающий осуществление научного обоснования нормативов допустимого загрязнения не в лабораторных условиях, а в естественной среде с определением критических уровней воздействия, критических техногенных нагрузок, суммарного показателя загрязнения  $Z_c$ , дозовых нагрузок [4]. Одним из методических приёмов достижения целей экологического нормирования является проведение исследований на полевых объектах (ППП) с разными уровнями загрязнения по градиенту расстояния от источников воздействия с последующим построением зависимостей «доза – эффект» [5–8]. При этом в качестве показателя, характеризующего воздействие загрязняющих веществ, зачастую используют величину выпадений фитотоксикантов на лесные насаждения (техногенная нагрузка), выраженную в кг/га или т/км<sup>2</sup>, что позволяет оценить потенциальную реакцию лесов уже на уровне проектирования промышленных объектов и определить значение допустимой техногенной нагрузки в полевых экспериментальных условиях с моделированием контролируемых значений выпадений загрязняющих веществ [4, 9, 10, 12, 14].

Для этих целей в рамках проводимого эксперимента были заложены 3 стационарных опытных участка в сосняках зеленомошниковых

(в 15-летних культурах, средневозрастных, приспевающих и спелых насаждениях), имеющих фоновые показатели по уровню загрязнения, состоянию и таксационным характеристикам древостоя, характеру возобновления, живому напочвенному покрову [4]. Цинк в виде соли азотнокислого цинка ( $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) вносили на поверхность почвы по вариантам нагрузок (выпадения) элемента: в молодняках – 1) контроль (0 кг/га); 2) 70 кг/га; 3) 300 кг/га; 4) 900 кг/га; 5) 1 500 кг/га; 6) 2 250 кг/га; 7) 3 000 кг/га; в средневозрастных насаждениях – варианты 1–7 и 8) 600 кг/га; в спелых насаждениях – варианты 1–8 и 9) 9 000 кг/га.

Реакцию сосновых насаждений на разную техногенную нагрузку цинка на участках эксперимента при определении зависимости «доза – эффект» оценивали по таким показателям, как: индекс состояния, отпад деревьев, средний прирост по высоте, длина и дехромация хвои, всхожесть семян сосны, количество и сохранность самосева, количество всходов под пологом средневозрастных древостоев, доля выпавших видов травянистых растений и процент пожелтения мохового яруса при оценке живого напочвенного покрова. Использование такого набора показателей – индикаторов состояния – позволило достаточно полно охарактеризовать реакцию

сосновых экосистем на воздействие разных нагрузок цинка.

## Результаты и обсуждение

Результаты многолетних исследований показывают [4, 10–12, 15] (табл. 1), что индекс состояния молодняков и средневозрастных сосновых насаждений по всему градиенту расстояния от главного источника выбросов (комбинат по производству минеральных удобрений) колеблется в пределах от 1,38 (здоровые древостои) до 1,85 (слабоослабленные древостои) балла; для приспевающих/спелых насаждений – 1,52–2,03 балла [13]. В целом полученные значения индекса состояния свидетельствуют о незначительном ослаблении насаждений сосны в районе исследований.

С удалением от источника выбросов накопление в снеге техногенных веществ (за исключением никеля) имеет тенденцию к снижению, что также подтверждается отрицательным коэффициентом корреляции (табл. 1, 2). Полученные результаты в целом соответствуют выводам других авторов, отмечавших закономерное уменьшение техногенной нагрузки с увеличением расстояния от промышленных предприятий [5, 8, 16].

**Таблица 1. Состояние древостоев сосны и накопление тяжёлых металлов в снежном покрове на пробных площадях Воскресенского стационара ВНИИЛМ**

№ п/п	№ ППП	Расстояние от источника выбросов, км	Состав древостоев	Средний индекс состояния, балл	Накопление тяжёлых металлов в снеге (растворимые формы), кг/га					
					Cu	Zn	Ni	Co	Cd	сумма ТМ
Молодняки, средневозрастные насаждения										
1	1	4	10С	1,39	0,03	0,05	0,07	0,05	0,004	0,20
2	2	5	10С	1,74	0,01	0,10	0,10	0,14	0,005	0,36
3	3	4	10С	1,61	0,05	0,08	0,03	0,05	0,004	0,21
4	4	5	10С	1,65	0,01	0,20	0,20	0,01	0,006	0,43
5	7	10	10С	1,47	0,008	0,09	0,11	0,25	0,005	0,46
6	8	27	10С	1,52	0,008	0,04	0,10	0,01	0,004	0,16
7	9	16	10С	1,48	0,006	0,05	0,20	0,10	0,006	0,36
8	11	9	10С,ед.Е,Б	1,48	0,03	0,04	0,05	0,09	0,006	0,22
9	13	21	10С	1,47	0,02	0,05	0,03	0,02	0,004	0,12

ОКОНЧАНИЕ ТАБЛ. 1

№ п/п	№ ППП	РАССТОЯНИЕ ОТ ИСТОЧНИКА ВЫБРОСОВ, КМ	СОСТАВ ДРЕВОСТОЕВ	СРЕДНИЙ ИНДЕКС СОСТОЯНИЯ, БАЛЛ	НАКОПЛЕНИЕ ТЯЖЁЛЫХ МЕТАЛЛОВ В СНЕГЕ (РАСТВОРИМЫЕ ФОРМЫ), КГ/ГА					
					Сu	Zn	Ni	Co	Cd	СУММА ТМ
10	14	20	10С	1,64	0,002	0,03	0,10	0,02	0,002	0,15
11	21	23	10 С	1,85	0,004	0,09	0,09	0,01	0,002	0,20
12	15	25	10С	1,62	0,005	0,11	0,07	0,02	0,003	0,21
13	22	30	10С	1,74	0,005	0,09	0,05	0,02	0,002	0,17
Приспевающие, спелые насаждения										
14	1А	4	1)10С ед.Л 2)10Л+К	1,52	0,02	0,30	0,02	0,04	0,004	0,38
15	2А	5	1)10С ед.Б 2)10С ед.Д,Б	1,91	0,01	0,10	0,10	0,14	0,005	0,36
16	3А	4,3	9С1Е ед.Б	2,03	0,05	0,08	0,03	0,05	0,004	0,21
17	4А	5	10С	1,92	0,01	0,20	0,20	0,01	0,006	0,43
18	5А	2	10С	1,94	0,05	0,08	0,03	0,05	0,004	0,21
19	7А	9	10С	1,72	0,008	0,09	0,11	0,25	0,005	0,46
20	8А	27	1)10С 2)10Д+Б	1,92	0,008	0,04	0,10	0,01	0,004	0,16
21	9А	16	10С	1,65	0,006	0,05	0,20	0,10	0,006	0,36
22	13А	21	10С	1,57	0,004	0,02	0,06	0,02	0,003	0,11
23	14А	20	10С	1,61	0,002	0,03	0,10	0,02	0,002	0,15
24	21А	23	10 С	1,78	0,004	0,09	0,09	0,01	0,002	0,20
25	15А	25	10С ед. Б	1,60	0,005	0,11	0,07	0,02	0,003	0,21
26	22А	30	1)10С 2)10Е	1,72	0,005	0,09	0,05	0,02	0,002	0,17

Таблица 2. Коэффициенты корреляции между накоплением тяжёлых металлов в снежном покрове, кг/га, и расстоянием, км, от источника выбросов (ИВ), индексом состояния древостоев

Показатель	Расстояние от ИВ	Сu	Zn	Ni	Co	Cd	Сумма ТМ
Молодняки, средневозрастные насаждения							
Расстояние от ИВ, км	–	-0,60	-0,25	-0,17	-0,45	-0,64	-0,54
t <sub>расч.</sub>	–	2,48	0,85	0,57	1,67	2,76	2,12
t <sub>табл.</sub> ; P=0,95	–	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2
Индекс состояния, балл	0,30	-0,40	0,44	0,01	-0,29	-0,51	-0,03
t <sub>расч.</sub>	1,04	1,45	1,62	0,03	1,00	1,97	0,10
t <sub>табл.</sub> ; P=0,95	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2
Приспевающие, спелые насаждения							
Расстояние от ИВ, км	–	-0,65	-0,48	0,02	-0,40	-0,62	-0,62
t <sub>расч.</sub>	–	2,83	1,81	0,07	1,45	2,61	2,61
t <sub>табл.</sub> ; P=0,95	–	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2
Индекс состояния, балл	-0,37	0,54	-0,12	0,07	0,05	0,34	0,07
t <sub>расч.</sub>	1,32	2,12	0,40	0,23	0,16	1,20	0,23
t <sub>табл.</sub> ; P=0,95	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2



Наиболее высокие значения коэффициентов корреляции между уровнем накопления ТМ в снеге и расстоянием от источника выбросов на ППП в обеих возрастных группах насаждений отмечаются по Cu ( $r = -0,60; -0,65$ ), Cd ( $r = -0,64; -0,62$ ) и сумме изученных тяжёлых металлов ( $r = -0,54; -0,62$ ), наименьшие – по Ni ( $r = -0,17; 0,02$ ) (см. табл. 2). Согласно шкале Чеддока [17], для Cu, Cd и суммы тяжёлых металлов характерна заметная теснота связи, для Co – умеренная, для остальных металлов – слабая связь. Указанные закономерности по значимости связи для обеих групп насаждений подтверждаются оценкой величины коэффициентов корреляции через коэффициенты Стьюдента  $t_{\text{расч.}} > t_{\text{табл.}}$ ;  $P = 0,95$  – по Cu:  $r = 2,48; 2,83$ ; по Cd:  $r = 2,76; 2,61$ ; по сумме металлов:  $r = 2,12; 2,61$ .

Между индексом состояния и расстоянием от источника выбросов для молодняков и средневозрастных насаждений установлена положительная слабая ( $r = 0,30$ ) корреляционная связь, а для спелых и перестойных – отрицательная слабая ( $r = 0,37$ ) (см. табл. 2). Другими словами, в первой группе насаждений при увеличении расстояния от источников выбросов наблюдается некоторое повышение индекса состояния древостоев, т. е. ухудшение их состояния; для второй группы характерна обратная тенденция. Отмеченные различия можно объяснить возрастными особенностями насаждений, поскольку, согласно выводам других исследователей [16], спелые и перестойные сосняки отличаются повышенной чувствительностью к техногенному воздействию по сравнению с более молодыми древостоями. Вместе с тем вычисленные коэффициенты корреляции между расстоянием от источника выбросов и состоянием древостоев для обеих групп насаждений не значимы, и мы можем рассматривать описанные выше закономерности только на уровне тенденций.

Изучение корреляционной зависимости между состоянием древостоев и уровнем выпадения тяжёлых металлов свидетельствует о слабом уровне связи по сумме ТМ как для молодняков и средневозрастных насаждений, так и для

древостоев старшего возраста (см. табл. 2). При этом в более устойчивых к загрязнению молодняках и средневозрастных насаждениях положительная связь ( $r = 0,44$ ), указывающая на возможность ухудшения состояния древостоев при увеличении нагрузок, отмечается только для Zn. Для других элементов характерен отрицательный коэффициент корреляции, за исключением Ni ( $r = 0,01$ ), что подтверждает отсутствие зависимости ослабления древостоев от техногенных выпадений. Для насаждений старшего возраста характерна более тесная положительная связь состояния с накоплением в снеге Cu ( $r = 0,54$ ;  $t_{\text{расч.}} = 2,12$ ) и, отчасти, Cd ( $r = 0,34$ ;  $t_{\text{расч.}} = 1,2$ ).

Вместе с тем в целом расчётные коэффициенты Стьюдента по всем изученным элементам в обеих группах насаждений (см. табл. 2), характеризующие достоверность связи между состоянием древостоев и величиной накопления ТМ в снежном покрове, ниже табличных ( $t_{\text{расч.}} < t_{\text{табл.}}$ ;  $P = 0,95$ ), что свидетельствует о недостоверности значений вычисленных коэффициентов корреляции. Следовательно, можно утверждать, что наблюдаемые величины накопления изученных тяжёлых металлов в снежном покрове не оказывают существенного влияния на состояние сосновых насаждений района исследований.

В ходе полевого эксперимента установлены регрессионные зависимости между изменением показателей состояния сосновой экосистемы и величиной техногенной нагрузки цинка [9]. Из 50-ти испытанных регрессионных уравнений линейной, параболической, гиперболической и логарифмической форм связи по значениям показателей их оценки были отобраны параболические и показательные уравнения регрессии, имеющие наиболее высокие коэффициенты детерминации (от 0,61 до 0,97) и достоверные, при заданном числе степеней свободы, величины критерия Фишера ( $F_{\text{факт.}} > F_{\text{табл.}}$ ) [17].

Для определения допустимых значений нагрузки цинка были использованы так называемые референсные (фоновые, нормальные) значения показателей состояния насаждений, включение которых в уравнения регрессии как

параметра позволило определить допустимый уровень выпадений цинка.

Результаты исследований показывают, что при внесении загрязнителя на почву наиболее чувствительно на его нагрузку реагируют сохранность самосева сосны, количество всходов и количество самосева в насаждении, что в целом соотносится с реакцией всхожести семян, полученной в лабораторном опыте [4]. Изменение цвета (дехромация) мохового покрова начинается с нагрузки цинка в 170 кг/га; при нагрузке более 200 кг/га наблюдается сокращение числа видов растений в составе травяного покрова, хотя отпад отдельных из них может отмечаться и при меньших уровнях выпадения (рисунок).

Рассчитанные средние значения допустимого уровня выпадений цинка для молодняков сосны колеблются в пределах от 26 г/м<sup>2</sup> = 260 кг/га (дехромация хвои) до 86 г/м<sup>2</sup> = 860 кг/га (длина хвои). То есть реакция древостоя на нагрузку цинка визуально проявляется, прежде всего, через изменение цвета хвои крон деревьев, что и было отмечено уже в первый год наблюдений за состоянием молодняков сосны в эксперименте с внесением солей цинка [12, 14, 15].

Как было обосновано раньше, за величину допустимого (критического) уровня выпадения (нагрузки) тяжёлых металлов следует принимать минимальные расчётные значения, поскольку именно они характеризуют начало структурно-функциональных перестроек в древостое. В таком случае по всем изученным показателям лесного насаждения можно принять следующие значения минимально допустимых уровней нагрузок цинка: сохранность самосева сосны (40 кг/га) > количество самосева сосны (70 кг/га) > количество всходов сосны (90 кг/га) > ежегодный прирост по высоте (140 кг/га) > дехромация мхов (170 кг/га) > количество выпавших видов травяного покрова = дехромация хвои деревьев (220 кг/га) > индекс состояния древостоя (420 кг/га) > отпад деревьев (540 кг/га) > длина хвои (620 кг/га).

Если сравнить фактические уровни выпадения цинка в лесные насаждения Воскресенского



**МИНИМАЛЬНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ ДОПУСТИМОГО УРОВНЯ  
ВПАДЕНИЙ ЦИНКА ПО РАЗНЫМ ПОКАЗАТЕЛЯМ СОСТОЯНИЯ  
КОМПОНЕНТОВ СОСНОВЫХ НАСАЖДЕНИЙ РАЙОНА  
ИССЛЕДОВАНИЙ:**

- 1 – сохранность самосева, % контроля;
- 2 – количество самосева сосны в насаждении, шт.;
- 3 – количество всходов сосны в насаждении, шт.;
- 4 – средний линейный прирост, см/год;
- 5 – дехромация мхов, %;
- 6 – дехромация хвои, %;
- 7 – количество выпавших видов травяного покрова, %;
- 8 – всхожесть семян сосны, шт.;
- 9 – индекс состояния, балл;
- 10 – отпад (доля погибших деревьев), %;
- 11 – длина хвои, мм

стационара с полученными допустимыми значениями, то можно подтвердить вышеприведенный вывод о том, что тяжёлые металлы не оказывают существенного влияния на состояние сосновых древостоев района исследований.

## Выводы

1. Невысокая теснота связи между индексом состояния древостоев и уровнем накопления в снежном покрове растворимых форм тяжёлых металлов для всех групп возраста насаждений свидетельствует, что наблюдаемый уровень загрязнения ТМ не оказывает существенного влияния на состояние сосновых лесов в районе исследований.

2. Это подтверждается результатами контролируемого эксперимента по обоснованию допустимых уровней выпадений цинка для сосновых насаждений, в котором установлено, что дехромация хвои как наиболее чувствительный



визуальный показатель состояния древостоя появляется при нагрузке Zn в 220 кг/га, тогда как расчётные значения выпадений элемента составляют 170 кг/га.

3. Использование статистического анализа корреляции между накоплением загрязнителей в снежном покрове и индексом состояния древостоев позволяет объективно оценивать степень влияния загрязнения окружающей среды тяжёлыми металлами на состояние насаждений.

4. По возрастанию значений минимально допустимых нагрузок цинка и снижению чувствительности изученных показателей состояния сосновых насаждений формируется следующий ряд: сохранность самосева сосны – количество самосева сосны – количество всходов сосны – ежегодный прирост по высоте – дехромация мхов – количество выпавших видов травяного покрова = дехромация хвои деревьев – индекс состояния древостоя – отпад деревьев – длина хвои.

## Список источников

1. Об экологическом развитии Российской Федерации в интересах будущих поколений. Доклад к заседанию Госсовета РФ. 27.12.2016. – Текст : электронный. – Режим доступа: <http://www.cenef.ru/file/Doklad.pdf> (дата обращения: 04.09.2018).
2. Стратегия экологической безопасности. Указ Президента от 19.04.2017 № 176. Номер опубликования: 0001201704200016. Дата опубликования: 20.04.2017.
3. О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2021 году: государственный доклад. – Москва, 2022. – 686 с.
4. Рыкова, Т.В. Лесоводственно-экологическая оценка устойчивости сосновых экосистем к загрязнению среды тяжелыми металлами : дис. ... канд. с.-х. наук : 4.1.6: утв. 28.11.2024 / Т.В. Рыкова. – Москва, 2024. – 171 с.
5. Воробейчик, Е.Л. Экологическое нормирование техногенных загрязнений наземных экосистем / Е.Л. Воробейчик, О.Ф. Садыков, М.Г. Фарафонов. – Екатеринбург : УИФ «Наука», 1994. – 280 с.
6. Кулагин, А.А. Древесные растения и биологическая консервация промышленных загрязнителей / А.А. Кулагин, Ю.А. Шагиева. – Москва : Наука, 2005. – 190 с.
7. Мартынюк, А.А. Сосновые экосистемы в условиях аэротехногенного загрязнения : монография / А.А. Мартынюк. – Москва : ВНИИЛМ, 2004. – 160 с.
8. Рассеянные элементы в бореальных лесах / отв. ред. А.С. Исаев. – Москва : Наука, 2004. – 616 с.
9. Рыкова, Т.В. Оценка реакции древостоя сосновых молодняков на внесение азотнокислого цинка в полевом эксперименте. – Текст : электронный // Лесохозяйственная информация : электрон. сетевой журн. – 2019. – № 1. – С. 137–148. DOI: 10.24419/LHI.2304–3083.2019.1.11. – Режим доступа: URL: <http://lhi.vniilm.ru> (дата обращения: 21.08.2020).
10. Мартынюк, А.А. Сосновые экосистемы в условиях аэротехногенного загрязнения, их сохранение и реабилитация : дис. ... д-ра с.-х. наук : 06.03.03 : утв. 02.10.09 / А.А. Мартынюк. – Москва, 2009. – 380 с.
11. Рыкова, Т.В. Лесоводственно-экологическая оценка устойчивости сосновых лесов к загрязнению среды тяжелыми металлами / Т.В. Рыкова // Охрана и рациональное использование лесных ресурсов : материалы XII международной конференции (КНР, провинция Хэйлунцзян, Хайхе, 1–4 августа 2023). – С. 76–84.
12. Мартынюк, А.А. Обоснование допустимых выпадений тяжелых металлов на сосновые экосистемы в полевом эксперименте / А.А. Мартынюк, Т.В. Рыкова // Лесной вестник. – 2016. – № 1. – С. 99–104.
13. Временная методика по учету сосновых насаждений, подверженных влиянию промышленных выбросов / Н.А. Воронков, В.М. Жирин, В.Д. Касимов, Л.Л. Коженков, А.А. Мартынюк. – Москва : ВНИИЛМ, 1986. – 35 с.
14. Рыкова, Т.В. Изучение реакции сосновых фитоценозов на выпадение тяжелых металлов в условиях полевого эксперимента. – Текст : электронный / Т.В. Рыкова // Лесохозяйственная информация : электрон. сетевой журн. – 2015. – № 1. – С. 62–71. – Режим доступа: URL: <http://lhi.vniilm.ru> (дата обращения: 21.08.2024).
15. Мартынюк, А.А. Закономерности загрязнения компонентов лесных экосистем и нормирование техногенного воздействия на леса / А.А. Мартынюк, Т.В. Рыкова // Лесной комплекс: состояние и перспективы развития : сб. науч. трудов по итогам Международной научно-технической конференции (1–30 ноября 2013). – Брянск : БГИТА, 2013. – С. 54–57.
16. Дончева, А.В. Ландшафт в зоне воздействия промышленности: монография / А.В. Дончева. – Москва : Лесная промышленность, 1978. – 98 с.
17. Лекции по статистике, электронное издание [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://smekni.com/a/215807/statistika/> (дата обращения: 21.08.2023).

## References

1. Ob ekologicheskom razvitii Rossijskoj Federacii v interesah budushchih pokolenij. Doklad k zasedaniyu Gossoвета RF. 27.12.2016. – Tekst : elektronnyj. – Rezhim dostupa: <http://www.cenef.ru/file/Doklad.pdf> (data obrashcheniya: 04.09.2018).
2. Strategiya ekologicheskoy bezopasnosti. Ukaz Prezidenta ot 19.04.2017 № 176. Nomer opublikovaniya: 0001201704200016. Data opublikovaniya: 20.04.2017.
3. O sostoyanii i ob ohrane okruzhayushchej sredy Rossijskoj Federacii v 2021 godu: gosudarstvennyj doklad. – Moskva, 2022. – 686 s.
4. Rykova, T.V. Lesovodstvenno-ekologicheskaya ocenka ustojchivosti sosnovykh ekosistem k zagryazneniyu sredy tyazhelymi metallami : dis. ... kand. s.-h. nauk : 4.1.6: utv. 28.11.2024 / T.V. Rykova. – Moskva, 2024. – 171 s.
5. Vorobejchik, E.L. Ekologicheskoe normirovanie tekhnogennykh zagryaznenij nazemnykh ekosistem / E.L. Vorobejchik, O.F. Sadykov, M.G. Farafontov. – Ekaterinburg : UIF «Nauka», 1994. – 280 s.
6. Kulagin, A.A. Drevesnye rasteniya i biologicheskaya konservaciya promyshlennykh zagryaznitelej / A.A. Kulagin, Yu.A. Shagieva. – Moskva : Nauka, 2005. – 190 s.
7. Martynyuk, A.A. Sosnovye ekosistemy v usloviyah aerotekhnogenogo zagryazneniya : monografiya / A.A. Martynyuk. – Moskva : VNIILM, 2004. – 160 s.
8. Rasseyannye elementy v boreal'nykh lesakh / otv. red. A.S. Isaev. – Moskva : Nauka, 2004. – 616 s.
9. Rykova, T.V. Ocenka reakcii drevostoya sosnovykh molodnyakov na vnesenie azotnokislogo cinka v polevom eksperimente. – Tekst : elektronnyj // Lesohozyajstvennaya informaciya : elektron. setevoy zhurn. – 2019. – № 1. – S. 137–148. DOI: 10.24419/LHI.2304–3083.2019.1.11. – Rezhim dostupa: URL: <http://lhi.vniilm.ru> (data obrashcheniya: 21.08.2020).
10. Martynyuk, A.A. Sosnovye ekosistemy v usloviyah aerotekhnogenogo zagryazneniya, ih sohranenie i reabilitaciya : dis. ... d-ra s.-h. nauk : 06.03.03 : utv. 02.10.09 / A.A. Martynyuk. – Moskva, 2009. – 380 s.
11. Rykova, T.V. Lesovodstvenno-ekologicheskaya ocenka ustojchivosti sosnovykh lesov k zagryazneniyu sredy tyazhelymi metallami / T.V. Rykova // Ohrana i racional'noe ispol'zovanie lesnykh resursov : materialy HII mezhdunarodnoj konferencii (KNR, provinciya Hejlunczyan, Hajhe, 1–4 avgusta 2023). – S. 76–84.
12. Martynyuk, A.A. Obosnovanie dopustimyh vypadenij tyazhelykh metallov na sosnovye ekosistemy v polevom eksperimente / A.A. Martynyuk, T.V. Rykova // Lesnoj vestnik. – 2016. – № 1. – S. 99–104.
13. Vremennaya metodika po uchetu sosnovykh nasazhdenij, podverzhennykh vliyaniyu promyshlennykh vybrosov / N.A. Voronkov, V.M. Zhirin, V.D. Kasimov, L.L. Kozhenkov, A.A. Martynyuk. – Moskva : VNIILM, 1986. – 35 s.
14. Rykova, T.V. Izuchenie reakcii sosnovykh fitocenozov na vypadenie tyazhelykh metallov v usloviyah polevogo eksperimenta. – Tekst : elektronnyj / T.V. Rykova // Lesohozyajstvennaya informaciya : elektron. setevoy zhurn. – 2015. – № 1. – S. 62–71. – Rezhim dostupa: URL: <http://lhi.vniilm.ru> (data obrashcheniya: 21.08.2024).
15. Martynyuk, A.A. Zakonomernosti zagryazneniya komponentov lesnykh ekosistem i normirovanie tekhnogenogo vozdejstviya na lesa / A.A. Martynyuk, T.V. Rykova // Lesnoj kompleks: sostoyanie i perspektivy razvitiya : sb. nauch. trudov po itogam Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii (1–30 noyabrya 2013). – Bryansk : BGITA, 2013. – S. 54–57.
16. Doncheva, A.V. Landshaft v zone vozdejstviya promyshlennosti: monografiya / A.V. Doncheva. – Moskva : Lesnaya promyshlennost', 1978. – 98 s.
17. Lekcii po statistike, elektronnoe izdanie [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <https://smekni.com/a/215807/statistika> (data obrashcheniya: 21.08.2023)