

УДК 502.1

ОБОСНОВАНИЕ ДОПУСТИМЫХ ВЫПАДЕНИЙ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ НА СОСНОВЫЕ ЭКОСИСТЕМЫ В ПОЛЕВОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ

Т.В. РЫКОВА, *научный сотрудник ВНИИЛМ*⁽¹⁾,А.А. МАРТЫНЮК, *директор ВНИИЛМ, д-р с.-х. наук*⁽¹⁾

vniilm_martinuk@mail.ru, rykova.tv@mail.ru

⁽¹⁾ Всероссийский научно-исследовательский институт лесоводства и механизации лесного хозяйства, 141202, Московская обл., г. Пушкино, ул. Институтская, д.15.

Ухудшение состояния и снижение продуктивности лесов, обусловленные выбросами промышленных предприятий, содержащих тяжелые металлы, являются значимой экологической проблемой. Снижению поступления загрязняющих веществ в лесные экосистемы до безвредных для их жизнедеятельности количеств является важной научной и практической задачей. Нормированию техногенного воздействия с учетом реакции лесных экосистем на воздействие загрязнителей в естественных условиях местопроизрастания и посвящена данная статья. В качестве загрязнителя для экспериментов выбран цинк как один из наиболее распространенных тяжелых металлов, содержащихся в выбросах промышленных предприятий, который занимает среднее место по фитотоксичности среди тяжелых металлов. Были проведены полевые экспериментальные работы с контролируемым загрязнением лесных насаждений цинком (использовалась соль азотнокислого цинка $Zn(NO_3)_2 \cdot 7H_2O$). Состояние деревьев сосны определяли по методике ВНИИЛМ, специально разработанной для условий промышленного загрязнения среды. Степень ослабления насаждений характеризовалась средним индексом состояния, вычисленным как средневзвешенное через баллы состояния отдельных деревьев. Исследования проводились в молодняках сосны на территории Виноградовского лесничества Московской области. Для экспериментов выбраны лесные насаждения с минимальным уровнем содержания химических веществ в компонентах среды – почве, снеге, дождевых осадках, хвое. Приведены результаты изучения реакции (индекса состояния древостоев, биометрических показателей хвои) молодняков сосны обыкновенной на различные уровни выпадений цинка в полевом эксперименте. Даны регрессионные уравнения связи параметров состояния древостоев с уровнем техногенных нагрузок. Обоснована величина предельно допустимой нагрузки цинка для молодняков сосны обыкновенной Подмосковья.

Ключевые слова: загрязнение среды, тяжелые металлы, цинк, сосновые экосистемы, состояние древостоев, линейный прирост деревьев, естественное возобновление, допустимые техногенные выпадения.

Выбросы промышленных предприятий до настоящего времени остаются существенным фактором ухудшения состояния и снижения продуктивности лесов на значительных по площади территориях. Тяжелые металлы, поступающие в атмосферный воздух вместе с газовыми химическими веществами, отрицательно влияют на природные экосистемы, приуроченные к промышленным центрам цветной и черной металлургии, химической и нефтехимической промышленности, машиностроения. Суммарная площадь ареалов техногенно загрязненных земель в Российской Федерации, прежде всего тяжелыми металлами, достигает 18 млн га [1, 2].

В системе мероприятий по сохранению и реабилитации лесов в условиях техногенного загрязнения ведущее место принадлежит снижению поступления загрязняющих веществ в лесные экосистемы до безвредных для их нормальной жизнедеятельности объемов. Существует целое научное направление, целью которого является разработка предельно допустимых нормати-

вов техногенного воздействия и нормирование допустимых выбросов промышленных предприятий в атмосферу. Большинство нормативов данного вида разработаны на основе санитарно-гигиенических принципов нормирования и экспериментов, проводимых в лабораторных или лабораторно-тепличных условиях [3–7]. В последнее время получили известность научные работы с использованием экологических подходов в нормировании техногенного воздействия, позволяющих учитывать реакцию лесных экосистем на воздействие загрязнителей в естественных условиях местопроизрастания [8, 9, 11, 12] и, прежде всего, через нормирование выпадений техногенных веществ в лесные экосистемы. В развитие такого подхода нами были проведены экспериментальные исследования по обоснованию допустимых выпадений тяжелых металлов (на примере цинка) в сосновые экосистемы по их реакции на нормированное воздействие, изучаемое в полевых условиях.

Цинк выбран в качестве загрязнителя для экспериментов как один из наиболее

Биометрические показатели хвои средних деревьев в молодняках сосны
Biometrics needles indicators of the medium trees in young pine stands

№ п/п	Цинк, г/м ²	1999 год		2000 год				2001 год			
		% деревьев с пожелтевшей хвоей		Длина хвоинок, мм			Масса 100 шт. хвоинок, мг	Длина хвоинок, мм			Масса 100 шт. хвоинок, мг
		сильная	слабая	max	min	сред.		max	min	сред.	
1	0	0	8	82	61	73,3	3,37	82	53	65,2	3,04
2	6,9	0	12	87	51	67,2	2,88	85	60	69,1	3,12
3	30	0	17	89	66	77,9	3,36	76	52	63,6	3,27
4	90	9	46	94	51	79,9	3,93	68	48	58,0	3,86
5	150	13	52	92	64	75,0	3,56	75	44	62,9	3,42
6	225	47	38	75	46	60,5	2,67	60	46	52,7	2,32
7	300	94	6	55	26	36,9	1,18	54	33	43,9	1,23

Т а б л и ц а 2

Расчет величины предельно допустимой нагрузки цинка для древостоев молодняков сосны
The calculation of the value of the maximum permissible load for zinc stands of pine saplings

Показатель состояния древостоев	Уравнение связи	R ²	Критическое значение показателя ¹	Критическая нагрузка, г/м ²
Средний линейный прирост, см	$Y = -0,045x^3 + 6,441x^2 - 301,5x + 4758$	0,78	43,6 ¹	127
Средняя длина хвоинок, мм	$Y = -0,273x^2 + 21,46x - 120,3$	0,79	69,2 ¹	57
Масса 100 хвоинок, г	$Y = -94,83x + 393,6$	0,52	3,2 ¹	90
Средний индекс состояния, баллы	$Y = 26,99x^3 - 213,89x^2 + 654,47x - 550,4$	0,97	1,5 ²	41
Интегральный показатель, баллы	$Y = -14,04x^2 + 231,5x - 655,2$	0,88	4 ¹	46

Примечания: ¹Приняты средние значения показателей на контроле за весь период наблюдений. ²Принято значение нижнего предела категории состояния «здоровые насаждения» (ИС = 1,0 – 1,5)

распространенных тяжелых металлов, содержащихся в выбросах промышленных предприятий, который занимает среднее место по фитотоксичности среди тяжелых металлов (после меди, хрома и никеля).

Для решения поставленных исследовательских задач были проведены полевые экспериментальные работы с контролируемым загрязнением лесных насаждений цинком (использовалась соль азотнокислого цинка $Zn(NO_3)_2 \cdot 7H_2O$).

Исследования проводились в молодняках сосны (лесные культуры, состав – 10 С; возраст – 15 лет; бонитет – I; запас – 68 м³/га; тип условий произрастания – В₂) на территории Виноградовского лесничества Московской обл. Для экспериментов выбраны лесные насаждения с минимальным уровнем содержания химических веществ в компонентах среды – почве, снеге, дождевых осадках, хвое.

На опытном участке общей площадью 245 м² цинк был внесен в начале вегетации на поверхность почвы опытных площадок (площадь каждой из них составляла 40 м²) в следующих вариантах: 7 (величина таких выпадений обеспечивает расчетную концентрацию элемента в 20-см слое почвы на уровне ПДК = 23 мг/кг), 30, 90, 150, 225 и 300 г/м². Фитотоксический эффект воздействия загрязнителя на сосновые фитоценозы оценивали по изменению индекса состояния древостоев сосны, линейного прироста деревьев, показателей роста и степени поражения хвои, а также реакции самосева и подроста на различные техногенные нагрузки цинка.

При этом состояние деревьев сосны определяли по методике ВНИИЛМ, специально разработанной для условий промышленного загрязнения среды [10]. Степень ослабления насаждений характеризовалась средним индексом состояния, вычисленным как средне-

взвешенное через баллы состояния отдельных деревьев (на каждой опытной площадке оценивали состояние не менее 24 деревьев).

Ход роста насаждений по высоте (линейный прирост) оценивался по данным измерений прироста по мутовкам или данным анализа ствола 5 средних деревьев на пробной площади.

Образцы хвои для изучения ее биометрических показателей отбирали в верхней части кроны деревьев (третья-четвертая мутовки сверху) с побегов второго порядка (за побег первого порядка принят ствол дерева). Измерения длины хвои и массы хвоинок проводили в лаборатории в день отбора проб.

Для комплексной оценки влияния техногенной нагрузки на древостои сосны использован интегральный показатель (ИП), учитывающий изменение параметров состояния деревьев по отношению к контролю (1)

$$ИП = \sum_{n=1}^4 \left(\frac{L_K}{L} + \frac{L_K^{XB}}{L^{XB}} + \frac{M_K}{M} + \frac{ИС}{ИС_K} \right), \quad (1)$$

где ИП – интегральный показатель состояния древостоя, баллы;

L_K , L – средние значения линейного прироста деревьев на контроле и на вариантах с техногенной нагрузкой цинка за период наблюдений;

L_K^{XB} , L^{XB} – средние значения длины хвои деревьев на контроле и на вариантах с техногенной нагрузкой цинка за период наблюдений;

M_K , M – средние значения массы 100 штук хвоинок деревьев на контроле и на вариантах с техногенной нагрузкой цинка;

L_K , L – средние значения линейного прироста деревьев на контроле и на вариантах с техногенной нагрузкой цинка;

$ИС_K$, $ИС$ – средние значения линейного прироста деревьев на контроле и на вариантах с техногенной нагрузкой цинка.

Результаты экспериментальных исследований показывают, что первые симптомы избыточного содержания в почве $Zn(NO_3)_2$ появились при нагрузках более 150 г/м^2 в виде пожелтения хвои у деревьев сосны уже через 3 месяца после внесения элемента. Через год после внесения соли цинка (табл. 1) при на-



Рис. 1. Дехромация хвои в молодняках сосны на участке с дозой внесения цинка 300 г/м^2

Fig. 1. The dechromation of the needles in the young pine plot with a doze of zinc 300

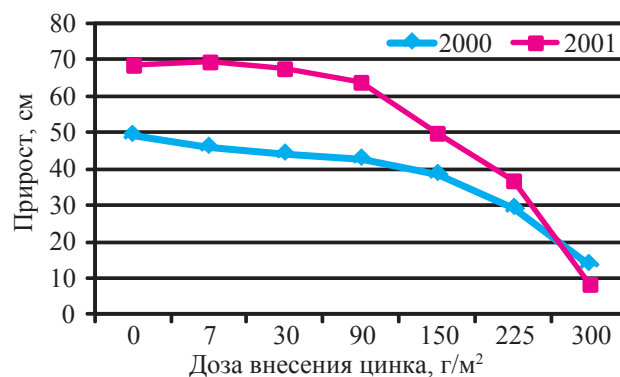


Рис. 2. Изменение линейного прироста деревьев в сосновом молодняке

Fig. 2. The change of the linear growth of pine trees in the young forest stands

грузках элемента 150 г/м^2 , 225 г/м^2 и 300 г/м^2 дехромация хвои наблюдалась у 13 %, 47 % и 94 % деревьев соответственно. Значительное увеличение доли пожелтевшей хвои 2-го года наблюдалось уже при 90 г/м^2 – 46 %; 150 г/м^2 – 52 %; и при дозах 225 г/м^2 – 38 %. При нагрузке 300 г/м^2 около 5 % деревьев сосны имела сильное поражение хвои (рис. 1).

При изучении биометрических показателей хвоинок сосны установлено, что нагрузки от 30 до 150 г/м^2 в первые годы наблюдений не оказывали влияния на длину и массу

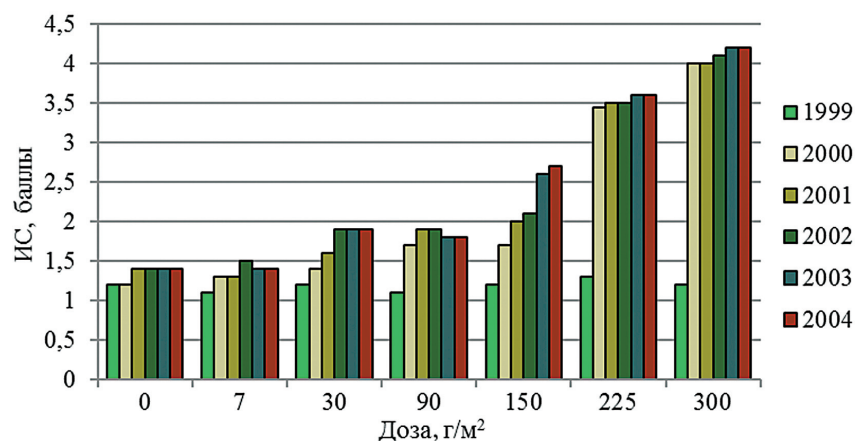


Рис. 3. Динамика изменения индекса состояния древостоев сосновых молодняков при разных дозах внесения цинка в почву

Fig. 3. The dynamics of changes in the condition index of forest stands in the growing stock of pine with different doses of introducing zinc into the soil

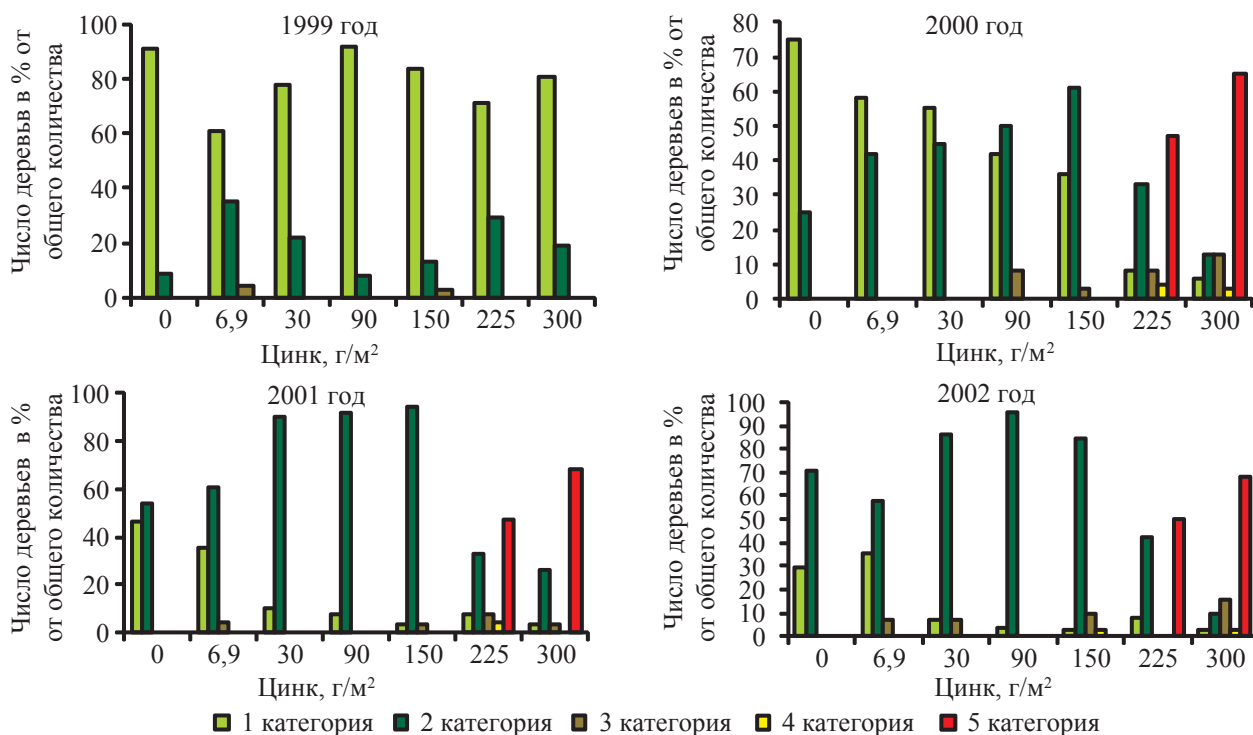


Рис. 4. Динамика распределения деревьев по категориям состояния в молодняках за 1999–2002 гг.

Fig. 4. The distribution of trees by the status category in young trees for 1999–2002

хвоинок текущего года. Однако более высокие дозы $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$ вызывали, в этот же период, значительное снижение показателей (табл. 1). При дозе 225 г/м² средняя длина хвоинок в 2000–2001 гг. уменьшилась, по сравнению с контролем, на 17–19 %, масса хвоинок – на 21–24 %. Уровень нарушения роста хвои еще больше усилился при дозе 300 г/м²: средняя длина хвоинок текущего года сократилась на 33–50 %, а масса 100 шт. хвоинок – на 60–65 %.

Линейный прирост осевого побега деревьев сосны (рис. 2) в условиях контроля достигал у измеренных деревьев в среднем 50 и 68 см в год (минимальные значения – 20 см, максимальные – 87 см). С повышением уровня нагрузки загрязнителя отмечалось снижение данного показателя по сравнению с контрольными значениями, причем устойчивое уменьшение начиналось при нагрузке в 30 г/м². При нагрузке цинка в 225 г/м² сниже-

ние среднего линейного прироста достигало примерно 50 % от значений контроля. Повышение техногенной нагрузки до 300 г/м² приводило к резкому падению линейного прироста до минимальных величин – 8–14 см в год.

Индекс состояния древостоев сосны как интегральный показатель их устойчивости (рис. 3) свидетельствует о постепенном ослаблении молодняков в течение 2000–2004 гг. начиная с нагрузки в 30 г/м². При этом за весь период наблюдений в контрольных древостоях и на участке с нагрузкой 7 г/м² индекс состояния древостоев изменяется незначительно и не выходит за пределы ИС = 1,5 – здоровые насаждения. При нагрузках 30–90 г/м² ухудшение состояния древостоев наблюдалось на следующий, после внесения цинка, год; причем, переход критического значения состояния с ИС = 1,5 в первом случае (при нагрузке 30 г/м²) происходил на втором году эксперимента, во втором случае (нагрузка 90 г/м²) – на третьем году эксперимента.

Существенные различия в состоянии насаждений между контролем и участками с внесенным цинком начинали наблюдаться при нагрузке 150 г/м²: на второй год наблюдений индекс состояния древостоев ухудшился на 17 %, а на шестом году – на 52 %. С дальнейшим увеличением нагрузки эти отклонения возрастают, а при нагрузке 300 г/м² наблюдается массовое усыхание деревьев, в результате которого средний индекс состояния ухудшается с 1,2 балла в 1999 г. до 4,2 балла в 2003–2004 гг.

Интерес представляют данные по переходу деревьев, связанному с увеличением уровня техногенной нагрузки, из более высоких категорий состояния в более низкие и, в конечном итоге, в отпад (рис. 4). В наблюдаемых древостоях по всем вариантам в начале эксперимента деревья сосны на 65–90 % соответствовали 1-ой категории состояния – «здоровые деревья». За весь период наблюдений на контроле фиксировалась тенденция к увеличению доли деревьев 2-й категории состояния – «слабо ослабленные деревья», однако здесь не появилось деревьев категории состояния 3 – «сильно ослабленные деревья». Вместе с тем, уже при малых техногенных нагрузках в 7 и 30 г/м² отмечалось появление

сильно ослабленных деревьев на третьем и четвертом годах эксперимента.

При максимальных нагрузках 225 г/м² и 300 г/м² большая часть деревьев на втором году наблюдения резко перешла в 5-ю категорию состояния – «погибшие деревья». В последующие годы количество этих деревьев только увеличивалось за счет перехода деревьев из более жизнеспособных категорий состояния. Следовательно, выпадения цинка способны существенно трансформировать состояние деревьев внутри древостоя, причем, наиболее губительными для молодняков сосны можно считать нагрузки в 225 г/м² и 300 г/м².

В табл. 2 приведены регрессионные уравнения связи показателей состояния (х) сосновых древостоев с уровнем выпадений цинка (у). С использованием уравнений через контрольные значения показателей состояния проведено вычисление величин критической техногенной нагрузки элемента для условий эксперимента.

Расчеты показывают, что при оценке по различным показателям состояния древостоев величина критических выпадений цинка в естественных условиях Подмосковья находится в пределах 41–127 г/м² (41–127 кг/га). При этом максимальные значения критической нагрузки (127 г/м²) определены по изменению линейного прироста деревьев при различных уровнях выпадений загрязнителя. В качестве предельно допустимой величины нагрузки цинка может быть рекомендована минимальная ее величина – 41 г/м², рассчитанная через значения среднего индекса состояния древостоев сосны.

Библиографический список

1. Большаков, В.А. Загрязнение почв / В.А. Большаков. – М.: ВИНТИ. – 2006. – 4 с.
2. О состоянии и использовании земель в Российской Федерации в 2005 г.: государственный (национальный) доклад. – М., 2006. – 200 с.
3. Временные нормативы ПДК загрязняющих веществ в атмосферном воздухе, оказывающих вредное воздействие на лесные насаждения в районе музея-усадьбы «Ясная Поляна». – М.: ВНИИЛМ, 1984. – 17 с.
4. Михайлова, Т.А. Эколого-физиологическое состояние лесов, загрязняемых промышленными эмиссиями: дисс. ... д-ра биол. наук: 03.00.16 / Михайлова Т.А. – Иркутск: СИФИБР, 1997. – 47 с.
5. Обухов, А.И. Научные основы разработки ПДК тяжелых металлов в почвах / А.И. Обухов, И.П. Бабьева,

- А.В. Гринь и др. // Тяжелые металлы в окружающей среде. – М.: МГУ, 1980. – 20 с.
6. Николаевский, В.С. Методика определения предельно допустимых концентраций вредных газов для растений / В.С. Николаевский, Т.В. Николаевская. – М., 1988. – 15 с.
7. Серебрякова, Л.К. Допустимые концентрации токсических веществ в атмосферном воздухе для древесной растительности / Л.К. Серебрякова // Газоустойчивость растений. – Новосибирск: Наука, 1980. – С. 184–185.
8. Воробейчик, Е.Л. Экологическое нормирование техногенных загрязнений наземных экосистем (локальный уровень) / Е.Л. Воробейчик, О.Ф. Садыков, М.Г. Фарафонов. – Екатеринбург: Наука, 1994. – 280 с.
9. Крючков, В.В. Предельные антропогенные нагрузки и состояние экосистем Севера / В.В. Крючков // Экология. – 1991. – № 3. – С. 28–40.
10. Воронков, Н.А. Временная методика по учету сосновых насаждений, подверженных влиянию промышленных выбросов / Н.А. Воронков, А.А. Мартынюк, В.Д. Касимов и др. – М.: ВНИИЛМ, 1986. – 36 с.
11. Air Quality Guidelines – Ecological effects of air pollutants // World Health Organization; Regional Office for Europe; ICP/CEN 902/m 71(S). – 29 July, 1985.
12. Prinz, B. Study on the impact of the principal atmospheric pollutants on the vegetation / B. Prinz, C.I. Brandt // Commission of the European Communities. – EUR 6644 EN / 1980.

STUDIES OF PINE PHYTOCOENOSIS RESPONSES ON HEAVY METAL FALLOUTS IN FIELD EXPERIMENT

Rykova T.V., VNIILM⁽¹⁾; Martynuk A.A., VNIILM, Dr. Sci. (Agriculture)⁽¹⁾

vniilm_martinuk@mail.ru, rykova.tv@mail.ru

⁽¹⁾All-Russian Research Institute for Silviculture and Mechanization of Forestry (VNIILM), Institutskaya st., 15, 141202, Pushkino, Moscow reg., Russia

Deterioration and reduction of forest productivity due to the industrial emissions containing heavy metals are important environmental issues. The reduction of pollutants in forest ecosystems until they are harmless is an important scientific and practical task. Standardization of anthropogenic impact taking into account the reaction of forest ecosystems to the effects of pollutants under natural conditions is the subject of this article. Zinc was selected as a contaminant for the experiments as one of the most common heavy metals contained in industrial emissions with medium phytotoxicity. Field experimental work has been done with controlled contamination of the forest stands by zinc (based on the salt of zinc nitrate $Zn(NO_3)_2 \cdot 7H_2O$). The condition of trees was determined by the method of VNIILM specially designed for industrial pollution. The degree of weakening of the stands characterized by an average condition index was calculated as the average measured through the condition of individual trees. The studies were conducted in young pine stands on the territory of the Vinogradovsky forest area of Moscow region. For the experiments forest stands were selected with a minimum level of chemical contents in the components of environment – the soil, snow, rainfall, needle. The results of the study of the reaction (the index status of stands, biometric exponents of needles) of Scotch pine saplings to different levels of zinc deposition in a field experiment are given. The regression equations relating the parameters of state stands to the level of technogenic-governmental loads are presented. The value of the maximum permissible load of zinc for young pine suburbs is shown.

Keywords: pollution, heavy metals, zinc, pine ecosystem, the state stands, linear growth of trees, natural regeneration, the admissible anthropogenic loss.

References

1. Bol'shakov, V.A. *Zagryaznenie pochv* [Soilcontamination]. Moscow: VINITI, 2006, 4 p.
2. *O sostoyanii i ispol'zovanii zemel' v Rossiyskoy Federatsii v 2005 godu: gosudarstvennyy (natsional'nyy) доклад* [On the status and use of land in the Russian Federation in 2005: the sovereign-governmental (national) report]. Moscow, 2006, 200 p.
3. *Vremennyye normativy PDK zagryaznyayushchikh veshchestv v atmosfere muzeya-usad'by «Yasnaya Polyana»* [Time limit values of pollutants in ambient air, to render-ing harmful effects on forest plantations in the area of the Museum-Estate «Yasnaya Polyana»]. Moscow: VNIILM, 1984, 17 p.
4. Mikhaylova T.A. *Ekologo-fiziologicheskoe sostoyanie lesov, zagryaznyaemykh promyshlennymi emissiyami* [Ecological and physiological condition of forests polluted by industrial emissions]: dis. ... d-r biol. nauk: 03.00.16, Irkutsk: SIFiBR, 1997, 47 p.
5. Obukhov A.I., Bab'eva I.P., Grin' A.V. i dr. *Nauchnye osnovy razrabotki PDK tyazhelykh metallov v pochvakh* [The scientific basis for the development of MPC heavy metals in soils]. Tyazhelye metally v okruzhayushchey среде. [Heavy metals in the environment]. Moscow: MGU, 1980, p. 20.
6. Nikolaevskiy V.S., Nikolaevskaya T.V. *Metodika opredeleniya predel'no dopustimyykh kontsentratsiy vrednykh gazov dlya rasteniy* [Method for determining the maximum permissible concentrations of harmful gases to plants]. Moscow, 1988, 15 p.
7. Serebryakova L.K. *Dopustimyye kontsentratsii toksicheskikh veshchestv v atmosfere dlya drevesnoy rastitel'nosti* [Allowable concentrations of toxic substances in the air for woody vegetation]. Novosibirsk: Nauka, 1980, pp. 184–185.
8. Vorobeychik E.L., Sadykov O.F., Farafonov M.G. *Ekologicheskoe normirovanie tekhnogennykh zagryazneniy nazemnykh ekosistem (lokal'nyy uroven')* [Environmental regulation of technogenic pollution of terrestrial ecosystems (local level)]. Ekaterinburg: Nauka, 1994, 280 p.
9. Kryuchkov V.V. *Predel'nye antropogennyye nagruzki i sostoyanie ekosistem Severa* [Limit anthropogenic pressures and ecosystem of the North], *Ekologiya* no. 3, 1991, pp. 28–40.
10. Voronkov N.A., Martynuk A.A., Kasimov V.D. i dr. *Vremennaya metodika po uchetu osnovnykh nasazhdeniy, podverzhennykh vliyaniyu promyshlennykh vybrosov* [Provisional guidelines on accounting pine plantations are exposed to industrial emissions-represented]. Moscow: VNIILM, 1986, 36 p.
11. Air Quality Guidelines – Ecological effects of air pollutants World Health Organization ; Re-gional Office for Europe ; ICP/CEN 902/m 71(S). 29 July, 1985.
12. Prinz B. Study on the impact of the principal atmospheric pollutants on the vegetation Commission of the European Communities. EUR 6644 EN, 1980.