

УДК 630.232

Миграция микроэлементов при использовании осадков промышленно-бытовых сточных вод в качестве органических удобрений в лесном хозяйстве

Н. Н. КУЛИКОВА, Л. Ф. ПАРАДИНА, А. Н. СУТУРИН, И. В. ТАНИЧЕВА, С. М. БОЙКО, Е. И. КОЗЫРЕВА, Е. В. САЙБАТАЛОВА

*Лимнологический институт Сибирского отделения РАН,
ул. Улан-Баторская, 3, Иркутск 664033 (Россия)**E-mail: kulikova@lin.irk.ru*

(Поступила 30.11.04)

Аннотация

Исследовано влияние осадков промышленно-бытовых сточных вод, применяемых в качестве органического удобрения, на макро- и микроэлементный состав лесного травостоя, подроста сосны и лиственницы. Установлено, что при внесении осадков содержание ряда химических элементов в почве увеличивается. Концентрация некоторых элементов (V, Mn, Ni, Cr, Zn) достигает ПДК_т. На увеличение в почве с осадком концентрации химических элементов наиболее активно реагируют растения травяного покрова. Максимальные изменения отмечены в элементном составе корней травянистых растений.

ВВЕДЕНИЕ

Использование осадков промышленно-бытовых сточных вод (ОСВ) для удобрения почв при выращивании лесопосадочного материала, озеленении городов и рабочих поселков, лесовосстановлении на вырубках, пустырях, прогалинах, в лесах рекреационного назначения, создании устойчивых и долговечных лесных экосистем на техногенно нарушенных землях считается одним из рациональных способов их утилизации [1]. Применение отходов от очистки сточных вод в данной области обусловлено дефицитом традиционных органических удобрений. Однако до настоящего времени большая часть ОСВ вывозится на свалки, и тем самым безвозвратно теряются необходимые при лесоразведении, лесовосстановлении и озеленении полезные компоненты: органическое вещество, соединения азота, фосфора, калия, биофильные макро-, микроэлементы – создаются опасные очаги загрязнения окружающей среды.

Основным фактором, сдерживающим применение ОСВ в лесном и сельском хозяйстве, является наличие в осадках тяжелых метал-

лов. В отличие от органических загрязнителей, которые при попадании в почву в процессе биологического круговорота постепенно утилизируются, соединения тяжелых металлов способны сохранять токсичность на протяжении десятилетий [2].

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В картах очистных сооружений Ангарской нефтехимической компании (АНХК) накоплено около 60 тыс. м³ ОСВ, которые представляют собой смешанный продукт очистки сточных вод АНХК, промышленных предприятий г. Ангарска и его бытовых стоков. Время хранения ОСВ в картах составляет от 4 до 8 лет.

Определение нормативных характеристик осадков: влажность, рН_{KCl}, содержание органического вещества, азота, фосфора, калия, микроэлементов (Pb, As, Hg, Ni, Cr, Mn, Zn, Cu), колититр, наличие яиц гельминтов, патогенных энтеробактерий, БКПП – выполнено в сертифицированной лаборатории Иркутского центра агрохимической службы, паразитологическом отделении и бактериологи-

ческой лаборатории Центра Госсанэпиднадзора Иркутской области методами, указанными в СанПиН 2.1.7.573–96.

Для изучения возможности использования ОСВ АНХК в качестве удобрений в центральной пойме р. Голоустной (Прибайкальский южно-таежный почвенный округ) на аллювиальной дерновой среднесуглинистой почве был заложен микрополевого опыт. Для эксперимента использовали однородный участок смешанного разнотравного леса с хорошо развитыми травостоем, подростом сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) и лиственницы сибирской (*Larix sibirica* Ledeb.). После снятия слоя дернины (10 см) на опытных делянках разме-

ром 2 × 2 м в верхнюю часть прикорневой зоны подростка сосны и лиственницы вносили по 10 кг/м² ОСВ с влажностью 60 %, затем удаленный слой дернины укладывали обратно. Контролем служили выделенные в пределах опытного участка делянки, на которые ОСВ не вносились. Опыт повторяли четырежды. Пробы почвы, травостоя, хвои подростка отбирали в августе, в течение шести лет.

Элементный состав проб, отобранных в микрополевого опыте, определяли атомно-эмиссионным (на приборе МАЭС-10) и масс-спектральным с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-МС) (на квадрупольном масс-спектрометре PlasmaQuad PQ2⁺) методами.

ТАБЛИЦА 1

Макро- и микроэлементный состав осадков сточных вод (ОСВ) АНХК ($n = 14$, $P_{0.95}$)

Элемент	Содержание			Элемент	Содержание				
	ОСВ АНХК	Нормативы*			ОСВ АНХК	Нормативы*			
		1	2	3		1	2	3	
<i>Макроэлементы, % (по массе)</i>									
Na	0.53 ± 0.17	–	–	0.63	P	1.92 ± 0.52	–	–	0.08
Mg	0.75 ± 0.18	–	–	0.63	K	0.51 ± 0.14	–	–	1.36
Al	3.7 ± 0.9	–	–	7.13	Ca	1.83 ± 0.43	–	–	1.37
Si	7.9 ± 0.4	–	–	33.0	Fe	4.03 ± 0.83	–	–	3.8
<i>Микроэлементы, мг/кг сухой массы</i>									
Li	18.5 ± 4.4	–	–	30	Zr	100 ± 20	–	–	300
Be	1.8 ± 0.4	–	–	6	Nb	4.1 ± 0.8	–	–	0.01
B	26.9 ± 6.3	–	–	10	Mo	8.2 ± 1.7	–	–	2
Sc	5.7 ± 1.0	–	–	1	Pd	0.30 ± 0.07	–	–	0.001
Ti	1530 ± 270	–	–	4600	Ag	15.6 ± 3.6	–	–	0.1
V	35.5 ± 6.9	–	–	100	Cd	5.7 ± 1.5	30	10	0.5
Cr	819 ± 80	–	500	200	Sn	51.6 ± 10.3	–	–	10
Mn	480 ± 40	2000	1500	850	Sb	7.1 ± 1.3	–	–	0.5
Co	62.4 ± 17.3	–	50	10	Ba	1160 ± 270	–	–	500
Ni	53.3 ± 15.3	400	100	40	La	15.7 ± 2.7	–	–	29–40
Cu	250 ± 50	1500	500	20	Yb	1.2 ± 0.2	–	–	3
Zn	1100 ± 260	4000	1200	50	W	10.5 ± 2.3	–	–	1
Ga	11.0 ± 2.6	–	–	15	Hg	0.9 ± 0.2	15	5	0.01
Ge	4.1 ± 1.2	–	–	5	Tl	2.5 ± 0.8	–	–	0.1
As	1.9 ± 0.5	20	–	1	Pb	131 ± 30	1000	200	10
Sr	240 ± 50	–	–	300	Bi	12.9 ± 2.7	–	–	0.8
Y	7.4 ± 1.3	–	–	15					

Примечания. 1. Содержание Au, Pt, Te, In, Hf, Ta, U, Th < 0.1 мг/кг. 2. $P_{0.95}$ – 95 %-й уровень вероятности, n – повторность.

*1 – нормативные требования к ОСВ СанПиН 2.1.7.573–96 [3], 2 – экологические нормативы [4], 3 – среднее содержание в почвах [5].

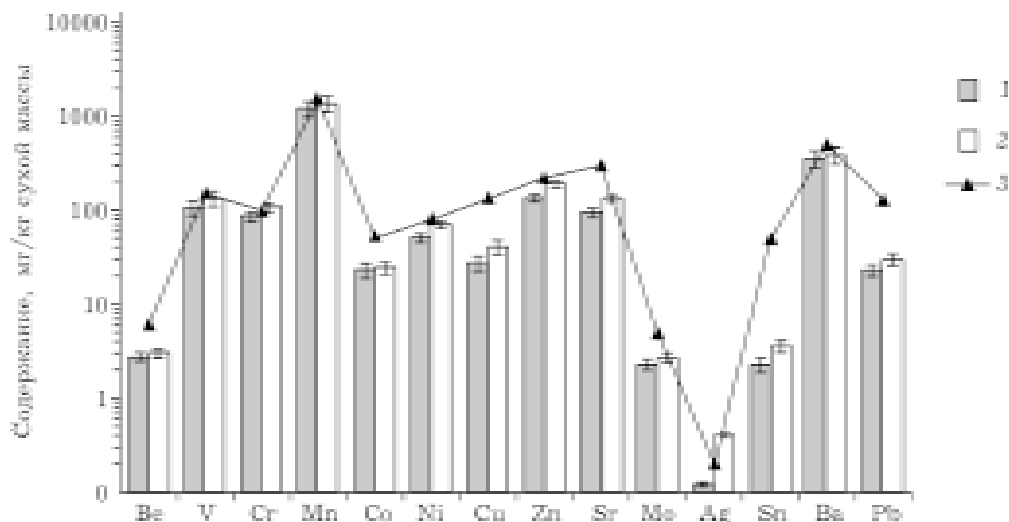


Рис. 1. Микроэлементный состав перегнойно-аккумулятивного горизонта А1 аллювиальной дерновой почвы: 1 – контроль (почва без удобрения), 2 – А1 + ОСВ (10 кг/м²), 3 – ПДК_п или среднее содержание (Be, Ag, Ba) в почве [5, 6]

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Исследуемые ОСВ представляют собой темноцветную массу влажностью 60–80 %, с высоким содержанием (50–60 %) органического вещества. Для ОСВ АНХК характерны значительная биофильных элементов, %: N 2.1–3.5, P 2.6–3.5, K 0.20–0.50; повышенное содержание аммиачного (900–1600 мг/кг) и нитратного (≈ 290 мг/кг) азота, слабокислая или близкая к нейтральной реакция солевой вытяжки (pH_{KCl} 5.5–6.8).

В минеральном составе ОСВ преобладают Si, Al, Fe. На уровне, близком к среднему содержанию в почвах, присутствуют Ca, Mg, Na. Чрезвычайно широкий спектр микроэлементов в осадках обусловлен разнообразием промышленных и бытовых источников сточных вод г. Ангарска. Содержание Pb, As, Hg, Cd, Ni, Cr, Mn, Zn, Cu в несколько раз меньше их нормативных показателей [3] и находится на уровне или несколько больше экологических нормативов для ОСВ, предложенных авторами [4]. Концентрации ряда ненормируемых по содержанию элементов (Ba, B, W, Mo, Sn, Sc, Ag, Pd, Sb, Tl, Bi, Nb) в ОСВ превышало их среднее содержание в почвах (табл. 1).

Особое значение для оценки ОСВ имеет характеристика их бактериологической и паразитологической загрязненности. В пробах ОСВ, отобранных из толщи (0–20, 50–60, 110–150 см) осадков различных карт, а также полигона, на который свозились осадки при освобождении

карт, жизнеспособные яйца гельминтов и цисты простейших не обнаружены. Ни в одной из проб не выявлены патогенные микроорганизмы и бактерии группы кишечной палочки.

В аллювиальной дерновой среднесуглинистой почве, на которой заложен микрополевого опыт, при внесении 10 кг/м² осадка повышалось содержание Ni, Cu, Zn, Sr, Ag, Sn, Pb. Верхний предел концентрации V, Mn, Ni, Cr, Zn достигал уровня ПДК_п (рис. 1). Отрицательной реакции растений на присутствие ОСВ в почве не наблюдалось. Напротив, удобрение почвы стимулировало развитие подроста: средний прирост в высоту за исследуемый период для сосны и лиственницы варианта А1 + ОСВ превосходил контрольный (рис. 2).

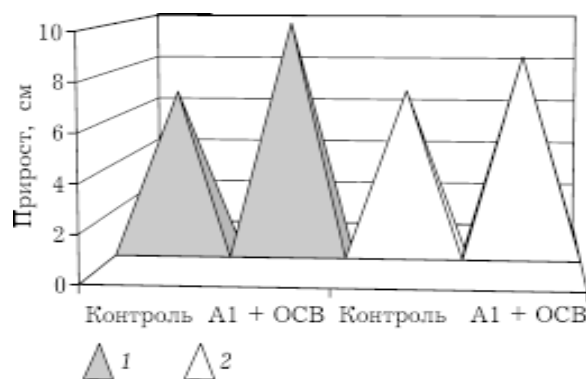


Рис. 2. Средний прирост ($n = 9$) в высоту сосны (1) и лиственницы (2) на делянках микрополевого опыта за период с 03.07.1997 г. по 03.09.1997 г.

ТАБЛИЦА 2

Содержание макро- и микроэлементов в образцах травяного покрова смешанного леса ($n = 4$, $P_{0,95}$)

Элемент	Вариант опыта	Содержание*, мг/кг сухой массы	
		Корни	Надземная масса
Na	Контроль	270 ± 20/280 ± 23	520 ± 40/360 ± 30
	A1 + ОСВ	390 ± 30/270 ± 23	350 ± 30/250 ± 20
K	Контроль	1600 ± 190/-	2900 ± 340/-
	A1 + ОСВ	1720 ± 200/-	3140 ± 370/-
Mg	Контроль	1020 ± 90/1010 ± 90	2560 ± 230/3130 ± 280
	A1 + ОСВ	1270 ± 110/1870 ± 160	2980 ± 270/3080 ± 280
Ca	Контроль	3310 ± 160/2630 ± 120	5420 ± 260/5460 ± 250
	A1 + ОСВ	3110 ± 150/2490 ± 120	6580 ± 310/6040 ± 300
Fe	Контроль	590 ± 30/590 ± 30	190 ± 10/120 ± 7
	A1 + ОСВ	470 ± 25/420 ± 20	195 ± 11/125 ± 6
Al	Контроль	580 ± 20/375 ± 15	300 ± 10/195 ± 6
	A1 + ОСВ	560 ± 20/240 ± 10	270 ± 10/190 ± 6
P	Контроль	690 ± 50/710 ± 50	1530 ± 110/1490 ± 110
	A1 + ОСВ	720 ± 70/680 ± 50	1350 ± 100/1230 ± 90
Cd	Контроль	0.25 ± 0.02/0.39 ± 0.03	0.26 ± 0.03/0.31 ± 0.03
	A1 + ОСВ	2.10 ± 0.20/3.90 ± 0.3	0.90 ± 0.10/0.90 ± 0.10
Pb	Контроль	1.68 ± 0.15/0.28 ± 0.03	0.35 ± 0.03/0.15 ± 0.03
	A1 + ОСВ	1.56 ± 0.14/0.68 ± 0.07	0.61 ± 0.05/0.20 ± 0.02
Zn	Контроль	44 ± 4/59 ± 6	29 ± 3/49 ± 5
	A1 + ОСВ	165 ± 17/190 ± 18	103 ± 10/100 ± 9
Co	Контроль	0.37 ± 0.03/0.18 ± 0.02	0.22 ± 0.02/0.19 ± 0.02
	A1 + ОСВ	1.05 ± 0.08/0.80 ± 0.06	0.43 ± 0.04/0.31 ± 0.03
Ni	Контроль	4.5 ± 0.7/6.0 ± 0.9	3.1 ± 0.5/4.9 ± 0.8
	A1 + ОСВ	8.9 ± 1.4/5.3 ± 0.9	6.0 ± 1.0/4.0 ± 0.7
Cr	Контроль	1.6 ± 0.2/1.1 ± 0.1	1.3 ± 0.2/1.9 ± 0.2
	A1 + ОСВ	6.9 ± 0.7/7.1 ± 0.9	1.9 ± 0.2/3.3 ± 0.4
Cu	Контроль	20.0 ± 2.3/38.9 ± 4.1	22.8 ± 2.5/43.0 ± 4.9
	A1 + ОСВ	25.1 ± 2.7/41.3 ± 4.5	29.0 ± 3.0/38.0 ± 4.3
Mn	Контроль	90 ± 14/160 ± 25	120 ± 20/130 ± 20
	A1 + ОСВ	160 ± 25/180 ± 30	140 ± 22/150 ± 25
Ag	Контроль	0.15 ± 0.02/0.15 ± 0.02	0.14 ± 0.02/0.15 ± 0.02
	A1 + ОСВ	0.26 ± 0.03/0.25 ± 0.03	0.17 ± 0.02/0.16 ± 0.02
Sn	Контроль	5.1 ± 0.5/3.6 ± 0.4	4.5 ± 0.4/1.5 ± 0.2
	A1 + ОСВ	10.2 ± 1.0/4.9 ± 0.5	6.3 ± 0.5/2.2 ± 0.2
Rb	Контроль	3.7 ± 0.3/3.6 ± 0.3	5.3 ± 0.5/8.7 ± 0.7
	A1 + ОСВ	4.7 ± 0.4/4.0 ± 0.3	10.1 ± 0.8/12.2 ± 1.0
Sr	Контроль	21.1 ± 2.0/20.9 ± 2.3	28.2 ± 2.7/21.8 ± 2.3
	A1 + ОСВ	24.2 ± 2.0/21.4 ± 2.1	31.3 ± 3.0/23.5 ± 2.0
Mo	Контроль	0.86 ± 0.05/0.37 ± 0.02	0.60 ± 0.04/0.79 ± 0.05
	A1 + ОСВ	0.81 ± 0.04/0.42 ± 0.02	0.75 ± 0.04/1.15 ± 0.07

Примечание. Прочерк означает, что содержание не определялось.

*Первое значение – содержание на второй год после внесения ОСВ, второе – на шестой год.

Реакция травяного покрова на изменение элементного химического состава почвы оказалась весьма активной. На следующий год после внесения осадка в корнях и надземной массе травянистых растений по сравнению с контролем увеличилось содержание большинства микроэлементов. Снизилось лишь накопление Fe корнями и P зеленой массой. Активнее, чем в контроле, растения делянок с ОСВ поглощали

Cd, Zn, Mn, Ni, Cu, Co, Pb, Sn, Ag, Rb, Cr при их максимальном уровне в корнях. На шестой год после внесения ОСВ по-прежнему снижено содержание P в зеленой массе и Fe в корнях травяного покрова (табл. 2).

Увеличение содержания химических элементов при внесении ОСВ в почву установлено не только для корней травянистых растений, нередко обладающих практически без-

ТАБЛИЦА 3

Содержание макро- и микроэлементов в образцах хвои сосны и лиственницы ($n = 4$, $P_{0.95}$)

Элемент	Вариант опыта	Содержание*, мг/кг сухой массы	
		Сосна	Лиственница
Na	Контроль	190 ± 20/170 ± 20	140 ± 10/160 ± 10
	A ₁ ± ОСВ	160 ± 20/160 ± 20	130 ± 10/165 ± 15
K	Контроль	2090 ± 110/2900 ± 150	2080 ± 110/2060 ± 120
	A ₁ ± ОСВ	2240 ± 120/2770 ± 150	2390 ± 130/2060 ± 110
Mg	Контроль	1120 ± 70/2770 ± 180	1160 ± 80/2720 ± 180
	A ₁ ± ОСВ	1220 ± 80/2960 ± 190	1200 ± 80/3090 ± 200
Ca	Контроль	3320 ± 310/6280 ± 610	3210 ± 320/5750 ± 560
	A ₁ ± ОСВ	3680 ± 360/5390 ± 520	3620 ± 350/5310 ± 510
Fe	Контроль	273 ± 15/169 ± 16	212 ± 22/148 ± 38
	A ₁ ± ОСВ	283 ± 14/159 ± 15	224 ± 14/138 ± 20
Al	Контроль	57 ± 3/370 ± 17	48 ± 2/390 ± 20
	A ₁ ± ОСВ	95 ± 5/360 ± 15	107 ± 5/340 ± 15
P	Контроль	550 ± 30/460 ± 20	650 ± 30/1870 ± 90
	A ₁ ± ОСВ	640 ± 30/790 ± 40	650 ± 30/1970 ± 95
S	Контроль	83 ± 4/85 ± 3	105 ± 5/85 ± 4
	A ₁ ± ОСВ	103 ± 4/109 ± 4	113 ± 5/100 ± 4
Cd	Контроль	0.25 ± 0.02/0.36 ± 0.03	0.12 ± 0.01/0.13 ± 0.01
	A ₁ ± ОСВ	0.27 ± 0.03/0.32 ± 0.03	0.28 ± 0.03/0.19 ± 0.02
Pb	Контроль	1.79 ± 0.07/1.09 ± 0.05	0.94 ± 0.04/0.79 ± 0.03
	A ₁ ± ОСВ	1.00 ± 0.04/1.26 ± 0.05	1.08 ± 0.05/0.81 ± 0.03
Co	Контроль	0.84 ± 0.04/0.66 ± 0.03	0.95 ± 0.05/0.59 ± 0.03
	A ₁ ± ОСВ	0.31 ± 0.02/0.43 ± 0.02	0.83 ± 0.04/0.46 ± 0.02
Ni	Контроль	1.8 ± 0.1/2.0 ± 0.1	1.6 ± 0.1/2.3 ± 0.2
	A ₁ ± ОСВ	3.4 ± 0.2/2.8 ± 0.2	4.0 ± 0.3/2.3 ± 0.2
Cu	Контроль	35.8 ± 1.7/29.2 ± 1.4	24.8 ± 1.2/124.0 ± 6.0
	A ₁ ± ОСВ	71.7 ± 3.4/57.7 ± 2.6	24.3 ± 1.2/135.0 ± 6.5
Mn	Контроль	180 ± 15/240 ± 19	135 ± 10/660 ± 50
	A ₁ ± ОСВ	290 ± 20/320 ± 20	310 ± 20/950 ± 70
Ag	Контроль	0.24 ± 0.03/0.19 ± 0.02	0.29 ± 0.03/0.14 ± 0.01
	A ₁ ± ОСВ	0.17 ± 0.02/0.21 ± 0.01	0.29 ± 0.03/0.16 ± 0.01
Sn	Контроль	2.8 ± 0.2/1.6 ± 0.1	35.1 ± 3.0/13.6 ± 1.1
	A ₁ ± ОСВ	2.8 ± 0.2/1.5 ± 0.1	35.2 ± 3.0/15.4 ± 1.3
Rb	Контроль	4.5 ± 0.2/8.0 ± 0.4	-/9.1 ± 0.4
	A ₁ ± ОСВ	7.9 ± 0.4/11.1 ± 0.5	-/11.6 ± 0.5
Sr	Контроль	62 ± 2/138 ± 5	-/132 ± 5
	A ₁ ± ОСВ	82 ± 3/147 ± 6	-/123 ± 4
Mo	Контроль	0.30 ± 0.05/0.30 ± 0.05	0.24 ± 0.04/0.23 ± 0.02
	A ₁ ± ОСВ	0.32 ± 0.05/0.28 ± 0.03	Н. о./Н. о.

Примечание. Прочерк означает, что содержание не определялось, Н.о. – не обнаружено.

*Первое значение – данные 1997 г., второе – 2002 г.

барьерным типом поглощения [7], но и для хвои подроста сосны и лиственницы. В этом случае различия в элементном химическом со-

ставе образцов хвои древесных растений, отобранных с контрольных и опытных делянок, менее заметны. На второй год после внесе-

ния осадков в почву в хвое подроста сосны и лиственницы, для которой характерно максимальное накопление химических элементов [8], установлена более высокая по сравнению с контролем концентрация Р и S. Внесение ОСВ в почву не приводило к снижению поглощения подростом макроэлементов – Mg, P, S, K, Ca. Отмечено лишь уменьшение в хвое сосны концентрации Na (табл. 3). На второй и шестой годы после удобрения почвы осадком в хвое подроста установлено увеличение содержания Mn. Несколько повышенная концентрация Ni, Cu, Rb, Sr, Pb в хвое сосны и лиственницы делянок, удобренных осадком, к шестому году после внесения уменьшилась до уровня контрольной. Содержание Cd на второй год после внесения ОСВ было одинаковым для хвои подроста и контрольного, и опытного варианта (см. табл. 3). Следует отметить, что концентрация микроэлементов в хвое сосны и лиственницы, растущих на делянках с ОСВ, не достигала избыточного фитотоксичного уровня [8].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, содержание микроэлементов в почве, удобренной ОСВ очистных сооружений АНХК, не превышало ПДК_п. С внесением осадков в почву увеличивалось количество доступных для растений форм соединений микроэлементов, что нашло свое отражение в изменении элементного химического состава растений. Максимальное накопление микроэлементов наблюдалось в корнях травянистых растений. Под действием внесенных в почву осадков происходило определенное увеличение концентрации кадмия и цинка в корнях и зеленой массе травяного покрова смешанного леса и некоторое снижение поглощения корнями железа и поступления в надземную массу травостоя фосфора. Установлено, что влияние внесенного в почву осадка на элементный химический состав под-

роста более слабое. К шестому году проведения опыта содержание химических элементов в хвое сосны и лиственницы, где происходят основные процессы биосинтеза [9], достигало уровня контроля, причем подрост сосны и лиственницы удобренных делянок отличался более активным развитием.

Результаты опыта показали, что наиболее безопасный вариант утилизации осадков промышленно-бытовых сточных вод – это использование их при выращивании лесопосадочного материала, проведении лесовосстановительных мероприятий, в зеленом строительстве, при рекультивации (например, золоотвалов с последующим залужением и выращиванием древесных насаждений). В этом случае постепенно формируются близкие к природным биогеоценозы, для которых характерен минимальный выход химических элементов за пределы экосистемы.

Поскольку в рассматриваемом опыте есть пример накопления тяжелых металлов в растениях, осадки сточных вод АНХК, несмотря на соответствие нормативным требованиям, не могут быть рекомендованы для производства кормовых и пищевых продуктов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 D. H. Marx, C. E. Berry, P. P. Kormanik, Amer. Soc. Agron. Annu. Meet., Cincinnati, 1993, p. 322.
- 2 А. И. Обухов, И. О. Плеханова, Атомно-абсорбционный анализ в почвенно-биологических исследованиях, Изд-во МГУ, Москва, 1991, с. 98.
- 3 Гигиенические требования к использованию сточных вод и их осадков для орошения и удобрения. Санитарные правила и нормы СанПиН 2.1.7.573–96, Минздрав России, Москва, 1997.
- 4 Д. С. Орлов, Л. К. Садовникова, *Почвоведение*, 4 (1996) 517.
- 5 Г. В. Войткевич, А. В. Кокин, А. Е. Мирошников и др., Справочник по геохимии, Недр, Москва, 1990.
- 6 Г. П. Беспамятнов, Ю. А. Кротов, Предельно допустимые концентрации химических веществ в окружающей среде: Справочник, Химия, Ленинград, 1985.
- 7 А. Л. Ковалевский, Биогеохимия растений, Наука, Новосибирск, 1991.
- 8 А. Кабата-Пендиас, Х. Пендиас, Микроэлементы в почвах и растениях, Мир, Москва, 1989.
- 9 И. С. Мелехов, *Лесоведение*, Лесн. пром-сть, Москва, 1980.