

УДК 502/504:631.95

Л. В. КИРЕЙЧЕВА, А. В. ТИНЫГАЕВ

Государственное научное учреждение

«Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники и мелиорации имени А. Н. Костякова»

**МОДЕЛИРОВАНИЕ МИГРАЦИИ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ
В ПОЧВЕ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ОРГАНИЧЕСКИХ ОТХОДОВ***

Рассмотрены основные источники формирования органических отходов в Алтайском крае, представлены данные по среднему содержанию тяжелых металлов в различных видах отходов. Показано, что использование органических отходов в качестве удобрений может вызвать загрязнение почв. Для прогнозирования возможного загрязнения предложена математическая модель и компьютерная программа конвективно-диффузионного переноса тяжелого металла в почвенном растворе. Проверка адекватности модели осуществлена на сельскохозяйственных землях Рубцовского района Алтайского края.

Органические отходы, загрязнение почв, тяжелые металлы, математическая модель, конвективно-диффузионный перенос, сорбция, прогноз накопления тяжелых металлов.

The article considers main sources of formation of organic wastes in the Altai territory, gives an average content of heavy metals in different kinds of wastes and shows that usage of organic wastes as fertilizers can cause contamination of soils. For prediction of possible pollution there is proposed a mathematical model and computer program of convection – diffusion skewing of a heavy metal in the soil solution, its sorption by a solid phase and withdrawal by vegetation. Checking of the model adequacy was performed on the agricultural lands of the Rubtsovskij region of the Altai territory.

Organic wastes, contamination of soils, heavy metals, mathematical model, convection – diffusion skewing, sorption, prediction of heavy metals accumulation.

Важнейшая задача АПК — систематическое воспроизводство почвенного плодородия земель сельскохозяйственного назначения для получения высоких и стабильных урожаев сельскохозяйственных культур. При ограниченных ресурсах удобрений возрастает необходимость более широкого использования различных органических отходов в качестве нетрадиционных удобрений. К таким удобрениям можно отнести осадки сточных вод (ОСВ), сточные воды с различных сельскохозяйственных предприятий, городские сточные воды и другие органические отходы. Органические отходы обогащают почву элементами питания

растений в доступных формах, увеличивают содержание органического вещества почвы, определяющее ее эффективное и потенциальное плодородие.

В настоящее время на территории России накоплены миллионы кубометров твердых органических отходов и 51,4 км³ сточных вод ежегодно сбрасывается в водные объекты, что вызывает загрязнение природной среды [1]. Каждый год в Алтайском крае формируется свыше 40 тыс. т осадков сточных вод с очистных сооружений девяти крупнейших городов. Сроки хранения осадков в местах их обезвреживания (на иловых площадках) и складирования составляют от 1 до 30 лет в зависимости от объемов их поступления с очистных сооружений. За год в водные объекты Алтайского края

*Работа выполнена по гранту РФФИ 08-04-90302-Вьет_a

сбрасывается более 191 млн м³ загрязненных сточных вод. Эта ситуация требует неотложного решения проблемы — сохранить природную среду, защитив ее от загрязнения, и найти пути использования находящихся в отходах питательных веществ для повышения плодородия почвенного покрова.

Основными источниками органических отходов в крае являются сточные воды крупных городов и их осадки, а также животноводческие стоки. На рис. 1 показаны источники формирования органических отходов в крупном сельскохозяйственном регионе.

Сточные воды городов Алтайского края слабоминерализованные (0,65...1,1 г/л), по своему химическому составу преимущественно гидрокарбонатные, гидрокарбонатно-хлоридные натриевые,

натриево-кальциевые, со слабощелочной до щелочной реакцией среды (рН 7,2...9,0). В анионном составе преобладают гидрокарбонаты (62,3...481,9 мг/л) и хлориды (134,0...203,2 мг/л), в катионном составе — натрий (108,9...412,5 мг/л) и кальций (62,7...123,6 мг/л). Содержание окисляющихся веществ в сточных водах изменяется в пределах 101,3...1566,2 мгО₂/л на 7,2...56,1 % представленных органическими соединениями. Содержание основных элементов питания изменяется в следующих пределах: азота — 0...25,5 мг/л, фосфора — 0...48,2 мг/л, калия — 5,0...23,6 мг/л (по данным Алтайского филиала Научно-исследовательского института сточных вод «Прогресс», 2007).

По своим агрохимическим и санитарно-токсикологическим показателям многие осадки сточных вод,



Рис. 1. Крупные источники формирования органических отходов в Алтайском крае: ○ — сточные воды; ● — осадки сточных вод; ● — органические отходы животноводства и птицеводства

поступающие от городов, соответствуют требованиям ГОСТ 17.4.3.07–2001 и могут использоваться в качестве удобрения [2]. С каждой тонной сухих осадков в почву поступает свыше 300 кг органического вещества, до 10 кг азота, до 20 г фосфора, 15 г калия, а также необходимые для растений микроэлементы: цинк, медь, марганец, молибден, кобальт и др. В настоящее время в крае накоплено свыше 1,5 млн т осадков сточных вод, количество, достаточное для повышения плодородия почвы на площади более чем 25 тыс. га.

Объем животноводческих стоков только свинокомплекса «Антипинское» с поголовьем свиней 24 000 гол. составляет 150 тыс. м³ в год. В состав стоков входит большое количество органических и питательных элементов, необходимых растениям. Химический состав стоков во многом зависит от способа удаления его из помещений ферм. Животноводческие стоки характеризуются средней степенью минерализации. Концентрация растворенных веществ по сухому остатку варьирует по годам от 2409 до 5380 мг/л (в среднем 4002 мг/л), а прокаленный остаток — от 1418 до 3045 мг/л (среднее значение 2460 мг/л), что указывает на высокое содержание в свиностоках органических веществ. Это подтверждается данными по химическому потреблению кислорода, содержание которого варьирует в пределах 11 200...15 805 мг/л и в среднем составляет 13 958 мг/л. Из ионов солей в стоках в анионном составе преобладают бикарбонат-ион и хлор-ион, а из катионов — калий и кальций. Реакция свиностоков слабокислая, близкая к нейтральной (рН — 6,6). Свиноводческие стоки обладают высокой ценностью благодаря наличию элементов питания для растений, так как они содержат 744 мг/л азота, 532 мг/л фосфора и 843 мг/л калия. Соотношение N : P : K = 1,4 : 1,0 : 1,6 является благоприятным для растений (по данным Алтайского филиала Научно-исследовательского института

сточных вод «Прогресс», 2007). Азотсодержащие соединения находятся в растворенном, коллоидном и взвешенном состояниях и могут переходить из одного состояния в другое. Доминирующая форма азота в жидком навозе — аммиачная (82 %). Содержащийся в свиностоках фосфор органических соединений используется растениями лучше, чем фосфор минеральных удобрений. Калий в жидком навозе представлен исключительно растворимой формой и поэтому легко усваивается, он входит в состав растворимых солей во взвесах и коллоидных частицах. Кроме перечисленных основных питательных веществ, в свиностоках содержатся многие микроэлементы, поэтому жидкие органические удобрения — это комплексные полноценные удобрения.

Однако использование органических отходов в качестве удобрений может вызвать накопление в почве различных поллютантов, в том числе тяжелых металлов (ТМ). При ненормированном использовании органических отходов возникает ряд негативных процессов: занитрачивание почв, загрязнение почв и грунтовых вод тяжелыми металлами и другими поллютантами, засоление и осолонцевание почвы, снижение ее биологической активности за счет развития патогенной микрофлоры, ухудшение водно-физических свойств (И. П. Канардов, Г. Е. Мерзлая, М. Ф. Буданов, А. М. Можейко, В. Т. Додолина, Н. А. Романенко, Д. П. Гостищев, Р. П. Воробьева и др.).

По содержанию загрязняющих веществ органические отходы существенно различаются между собой (табл. 1).

В навозе крупного рогатого скота, птичьим помете концентрация тяжелых металлов не представляет серьезной опасности для почв и качества растениеводческой продукции. Содержание тяжелых металлов не превышает не только предельно допустимую концентрацию, предъявляемую к органическим удобрениям, но и их концентрацию в почве. В сточных водах и их осадках

Таблица 1

Среднее содержание тяжелых металлов и мышьяка в органических отходах Западной Сибири, мг/кг сухой массы (В. И. Усенко, 2000)

Органические отходы	Элемент													
	Cr +3	Co	Ni	Cu	Zn	As	Rb	Sr	Mo	Ag	Cd	Sn	Hg	Pb
Валовое количество														
Навоз КРС	15	< 7,5	20	16	60	—	22	85	—	—	1,8	—	0,002	< 7,5
Птичий помет	18	< 7,5	21	35	229	—	28	436	—	—	1,6	—	0,002	< 7,5
Безреагентные осадки сточных вод	1440	15,0	332	1317	2841	10,4	—	—	13,0	33,0	39,0	294	—	340
Реагентные осадки сточных вод	577	5,4	93	414	556	4,0	—	—	2,5	7,4	8,8	98	—	168
Предельно допустимая концентрация валового содержания (ГОСТ Р 17.4.3.07–2001)	500		200	750	1750	10					15		7,5	250
Подвижная форма														
Безреагентные осадки сточных вод	4,0	1,1	56	99	617	—	—	—	—	—	16,0		—	3,4
Реагентные осадки сточных вод	18,5	0,5	17	57	276	—	—	—	—	—	5,4	—	—	7,9

содержание тяжелых металлов значительно выше. В осадках сточных вод концентрации Cr^{+3} , Ni, Cu, Zn, Mo, Ag, Cd, Sn и Pb намного превышает их содержа-

ние в почве. При этом в безреагентных осадках сточных вод Ni и Pb в 7–9 раз больше, чем в почве, Cr^{+3} , Cu и Zn — в 14–19, Ag и Cd — в 195–330 раз (табл. 2).

Таблица 2

Валовое содержание тяжелых металлов и мышьяка в почвах Алтайского края, мг/кг [3]

Показатель	Природная зона						Предельно допустимая концентрация
	Засушливая степная (каштановые почвы, черноземы южные и обыкновенные). Город Рубцовск		Колочная степная (черноземы обыкновенные, выщелоченные, оподзоленные). Города Алейск, Барнаул		Лугово-степная (черноземы выщелоченные, оподзоленные). Город Бийск		
	Диапазон изменения	Среднее значение	Диапазон изменения	Среднее значение	Диапазон изменения	Среднее значение	
Свинец	3,9...41,1	20,4	11,7...28,5	22,0	7,9...28,5	13,8	32,0
Кадмий	0,01...1,34	0,66	0,18...0,45	0,4	0,18...0,44	0,31	2,0
Никель	5,1...35,6	21,7	24,6...47,3	30,0	19,2...41,4	29,9	80,0
Хром	7,2...60,0	29,7	18,2...224,0	54,8	54,5...84,2	75,6	100,0
Цинк	2,1...232,0	53,6	40,7...83,6	57,0	48,3...108,1	82,3	220,0
Медь	2,4...39,8	19,3	9,7...29,7	22,0	82,3	220,0	132,0
Ртуть	0...0,096	0,005	0,002...0,014	0,011	0,003...0,015	0,007	2,1
Мышьяк	0,1...14,6	3,3	1,2...12,4	7,0	6,3...19,6	13,6	10,0

Опасность, вызываемая загрязнением почв тяжелыми металлами, усугубляется их очень медленным выведением из почвы. Так, период удаления изменяется в зависимости от вида металла следующим образом: для Zn — 70–510 лет, Cd — 13–1100, Cu — 310–1500, для

Pb — 740–5900 лет. Для прогнозирования изменения содержания тяжелых металлов по профилю почвы при использовании в качестве удобрений органических отходов необходимо моделировать их миграцию в системе «органические отходы — почва —

грунтовые воды — растение».

Моделированием миграции и трансформации микроэлементов и тяжелых металлов в почве занимались многие российские и зарубежные ученые. Ряд математических моделей миграции представлен в работах А. С. Фрида, А. Б. Рубина, В. Г. Грановского, А. И. Голованова, В. М. Прохорова, А. Н. Николаенко, И. В. Ефремова, Ю. А. Мажайского, Ю. А. Пыха, И. Г. Малкина-Пых, В. Н. Башкина, С. В. Успенского, S. R. Ramireddygarı, R. S. Govindaraju, W. Reihera, L. Breuera, S. Xu и др. Модели миграции тяжелых металлов можно разделить на следующие группы: балансовые, статистические, конвективно-диффузионного переноса тяжелого металла в почвенном растворе, вероятностные. Однако существующие модели прогнозирования миграции тяжелых металлов в почве недостаточно полно отражают процессы накопления и миграции тяжелых металлов в системе «органические отходы — почва — грунтовые воды — растение». При использовании твердых и жидких органических отходов тяже-

лые металлы поступают в почву в форме растворимых соединений, в виде суспензий и нерастворимых соединений. Это закрепленные на поверхности гумусовые вещества, комплексные соединения с гумусом, гидратированные окислы алюминия, железа, марганца и др., а также малорастворимые соли тяжелого металла. Направленность и интенсивность процессов закрепления металлов в почве определяется как характеристиками самих металлов, так и составом и свойствами почвы, а также факторами внешней среды.

Авторами предложена модель поступления и миграции в почве тяжелых металлов при использовании твердых и жидких органических отходов (рис. 2). При этом в модели, наряду с конвективно-диффузионным переносом тяжелого металла в почвенном растворе, его сорбцией твердой фазой и выносом растительностью, учитывается поступление тяжелого металла в подвижной и фиксированной формах с органическими отходами, а также переход из фиксированной формы загрязнителя в почве в подвижную форму. Концептуальная

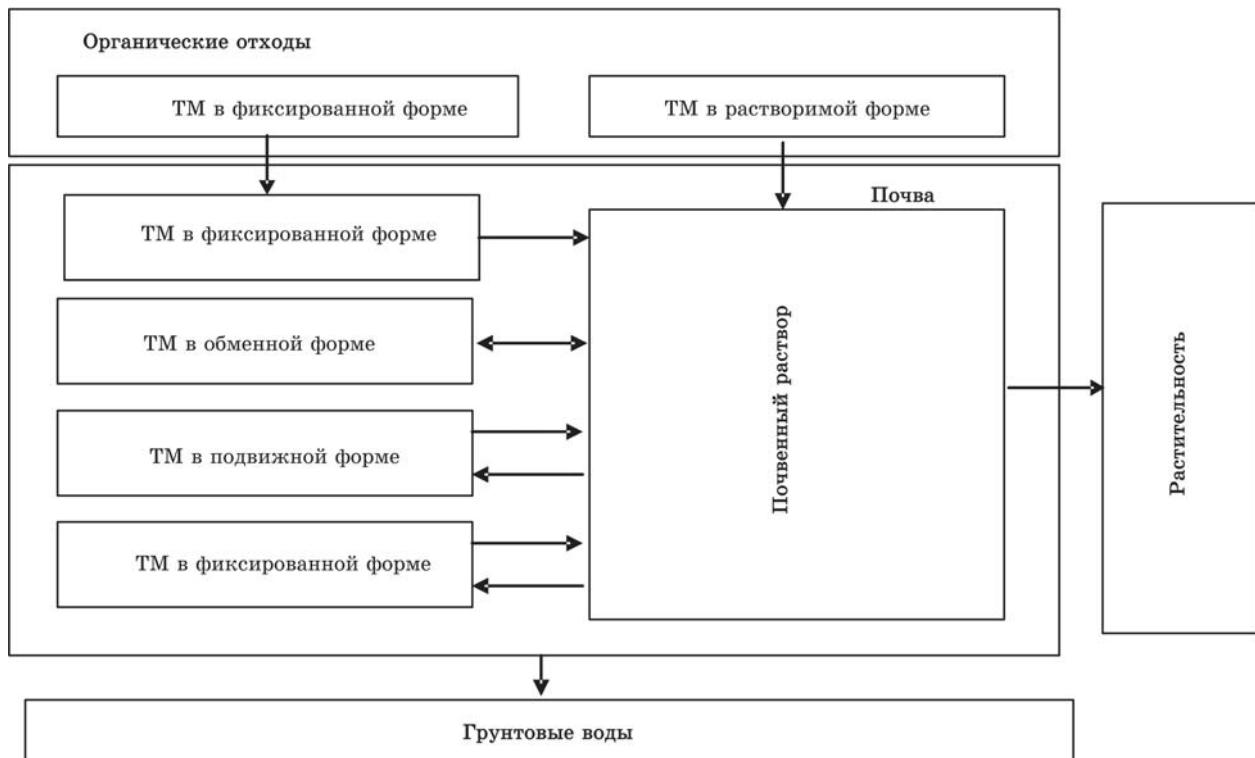


Рис. 2. Концептуальная схема модели миграции тяжелых металлов в системе «органические отходы — почва — грунтовые воды — растение»

схема модели миграции тяжелых металлов включает в себя четыре основных блока: органические отходы, почву, грунтовые воды, растительность (см. рис. 1).

Математическая модель имеет следующий вид:

$$\begin{cases} \frac{\partial Q_{pf}}{\partial t} = \frac{\partial S_{pr}}{\partial t} + \frac{\partial Q_{of}}{\partial t}; \\ W \frac{\partial Q_{pr}}{\partial t} = D \frac{\partial^2 Q_{pr}}{\partial x^2} - v \frac{\partial Q_{pr}}{\partial x} - \frac{\partial S_{pr}}{\partial t} - \frac{\partial S_p}{\partial t} + \frac{\partial Q_{or}}{\partial t}, \end{cases}$$

где Q_{of} — содержание тяжелых металлов в органическом отходе в фиксированной форме (связаны с органической составляющей отходов); Q_{or} — содержание тяжелых металлов в органическом отходе в растворимой форме; Q_{pr} — содержание тяжелых металлов в почвенном растворе (подвижная форма); k — коэффициент сорбции; k_{pf} — коэффициент перехода из фиксированной формы тяжелых металлов в почвенный раствор; W — объемная влажность почвы; $\partial S_{pr}/\partial t$ — интенсивность перехода тяжелых металлов из почвенного раствора в фиксированную форму; $\partial S_{pf}/\partial t$ — интенсивность перехода тяжелых металлов из фиксированной формы в почвенный раствор; $\partial S_p/\partial t$ — интенсивность отбора тяжелых металлов корнями растений; D — коэффициент конвективной диффузии; v — скорость фильтрации; ρ — плотность почвы;

$$S_p = \beta Q_{pr},$$

где β — коэффициент поглощения тяжелых металлов растениями [2].

Ввиду малой концентрации тяжелых металлов в почвенных растворах и большой емкости поглощения почвы можно использовать линейное уравнение изотермической сорбции Генри [2]:

$$S_{pr} = W Q_{pr} / \alpha,$$

где α — коэффициент изотермы сорбции.

Дополним нашу систему уравнений начальными и граничными условиями. На верхней ($x = 0$) и нижней ($x = L$) границах можно записать следующие условия:

$$Q_{pf} \Big|_{x=0} = Q_{pf0};$$

$Q_{pr} \Big|_{x=0} = Q_{pr0}$, если $v \geq 0$; при $v < 0$ поток влаги увлекает тяжелые металлы к поверхности почвы, где за счет концентрирования формируется встречный, уравновешивающий диффузионный поток;

$$\left(D \frac{\partial Q_{pr}}{\partial x} - v Q_{pr} \right) \Big|_{x=0} = 0.$$

Нижняя граница при $x = L$ совпадает с поверхностью грунтовых вод:

$$Q_{pf} \Big|_{x=L} = 0;$$

$$Q_{pr} \Big|_{x=L} = 0.$$

В модели первое уравнение характеризует интенсивность изменения фиксированной формы тяжелого металла в почве, второе — в почвенном растворе.

Для решения системы дифференциальных уравнений использовался метод двухслойной неявно конечно-разностной схемы.

Для прогнозирования миграции тяжелых металлов в почве при использовании органических отходов в качестве удобрений и проверки адекватности модели автором была разработана информационная технология «Миграция тяжелых металлов в почве».

Прогноз накопления тяжелых металлов в почве при использовании органических отходов можно рассмотреть в двух вариантах:

на весь период прогноза по заданному слою (от поверхности до уровня грунтовых вод);

изменение тяжелых металлов по почвенному профилю для конкретного периода.

Для проверки адекватности модели были использованы результаты исследований, проведенные Алтайским филиалом Научно-исследовательского института сточных вод «Прогресс» в городе Рубцовске. На сельскохозяйственных землях Рубцовского района вносили осадок сточных вод в период с 1993 по 1996 гг. с ежегодной нормой 20 т/га. В 1999 г. проводили исследования по изменению запаса гумуса и содержания тяжелых металлов в почвенном слое. Плотность сложения пахотного горизонта составляла 1,17 г/см³. Пористость верхних горизонтов — более 50 %. Максимальная гигроскопичность изменялась в пределах 5,2...7,2 %, а наименьшая влагоемкость — 19,8...24,2 %. Почвы лугово-черноземные, среднесуглинистые, слабогумусированные, среднесуглинистые. Валовое содержание азота, фосфора и калия в пахотном горизонте составляло соответственно 0,28; 0,15 и 2,24 %. Содержание подвижных форм азота, фосфора и калия — 21,1; 168,4 и

403 мг/кг соответственно. Емкость поглощения — 27,8...28,4 мг-экв/100 г. Степень насыщенности основаниями — высокая.

Содержание осадка сточных вод Рубцовска следующее: органическое вещество — 51,7 %, азот общий — 0,92 %, фосфор общий — 0,43 %, калий общий — 0,84 %. По содержанию тяжелых металлов — хрома, свинца, меди, марганца — подсушенный осадок сточных вод относится к первой группе в соответствии с ГОСТ Р 17.4.3.07–2001 — использование без ограничений; по содержанию цинка — ко второй группе и по содержанию никеля — к третьей группе. Расчет был выполнен для цинка (рис. 3).

В качестве критерия достоверности решения предложенной математической модели использован коэффициент несходимости Тейла. Модель считается адекватной, если коэффициент несходимости Тейла не превышает

25 %. Сравнение результатов прогноза содержания тяжелого металла, полученных с помощью математической модели, с результатами агрохимических исследований в период 1993–1999 гг. показало, что коэффициент несходимости Тейла не превышает 25 % для каждого из вариантов. Это свидетельствует о достаточной адекватности предложенной модели фактическим данным и возможности практического применения модели для прогноза миграции тяжелых металлов на длительные промежутки времени.

Результаты натурального и расчетного значений накопления цинка в почве при ежегодном внесении осадка сточных вод Рубцовска представлены на рис. 3.

Выполненный по модели прогноз накопления цинка в почвенном профиле при использовании осадка сточных вод продемонстрировал постепенное увеличение валового содержания Zn в верхнем почвенном слое 0...0,2 м на двадцатый год внесения в 1,4 раза. Распределение Zn по профилю почвы при ежегодном внесении 20 т/га осадка сточных вод города Рубцовска на двадцатый год показал, что содержание цинка в нижних слоях (2...2,5 м) практически не изменяется (рис. 4, 5).

Выводы

Предложенная математическая модель и составленная по ней компьютерная технология накопления и миграции тяжелых металлов в почве позволяют не только получать информацию о возможном загрязнении почвенного покрова при использовании в качестве

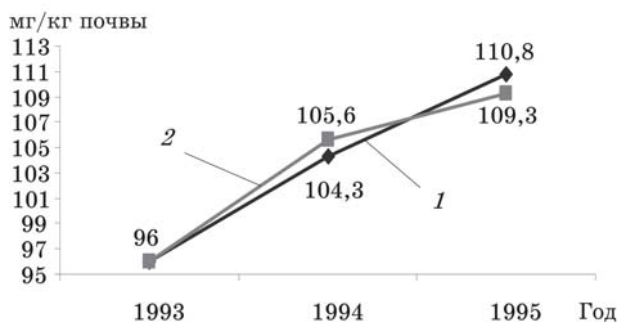
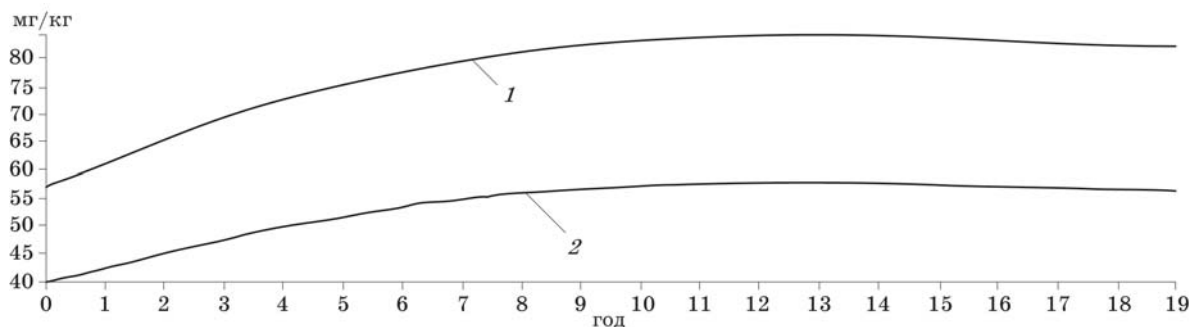
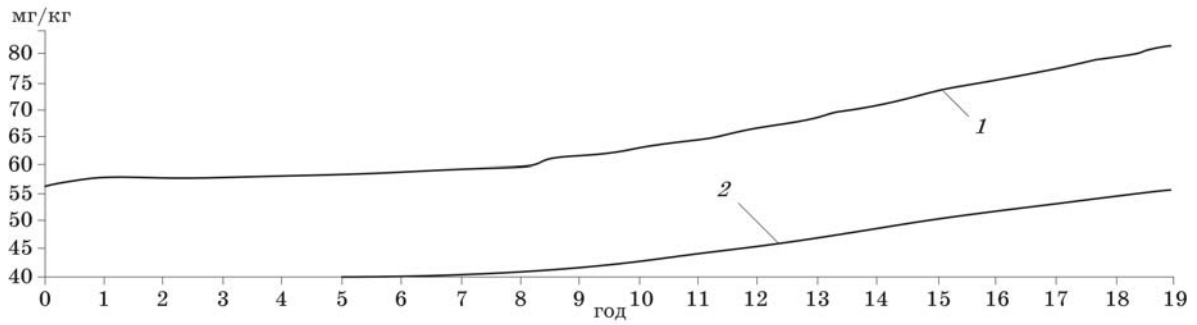


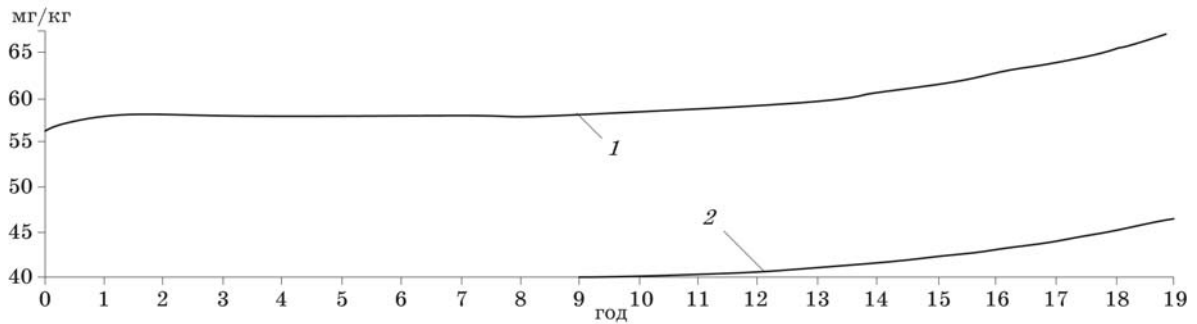
Рис. 3. Фактическое и расчетное содержание Zn в пахотном слое почвы при ежегодном внесении 20 т/га осадка сточных вод города Рубцовска: ◆ — расчетное содержание; ■ — фактическое содержание



а

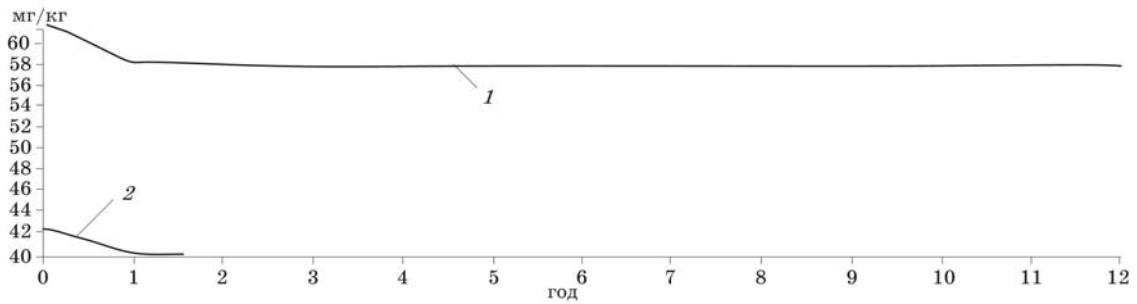


б

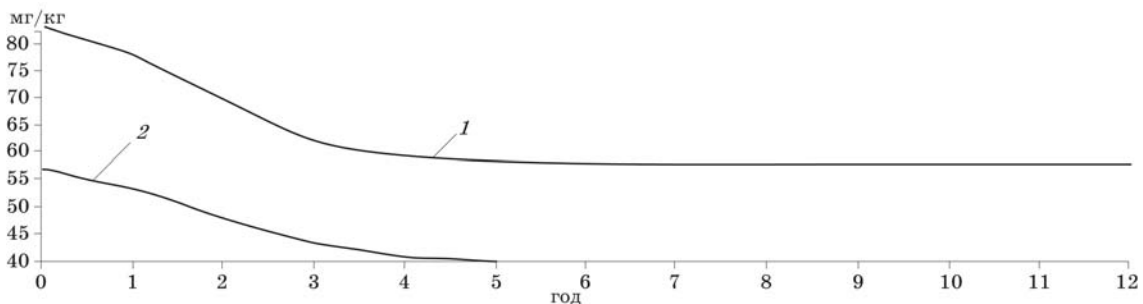


в

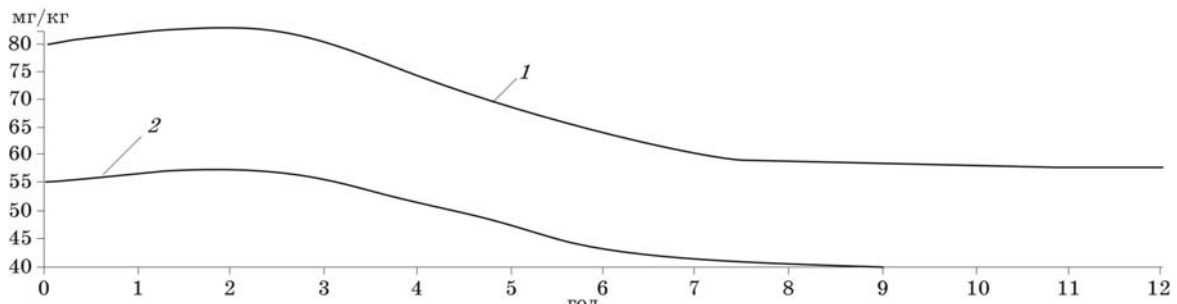
Рис. 4. Прогноз содержания Zn в почве при ежегодном внесении 20 т/га осадка сточных вод города Рубцовска: а — на поверхности почвы; б — на глубине 0,6 м; в — на глубине 1 м



а



б



в

Рис. 5. Прогноз распределения Zn по профилю почвы при ежегодном внесении 20 т/га осадка сточных вод города Рубцовска: а — первый год; б — десятый год; в — двадцатый год

органического удобрения твердых и жидких органических отходов, но и давать рекомендации о возможности и периодичности их использования в качестве нетрадиционных органических удобрений.

Список литературы

1. О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2006 году [Текст] : государственный доклад. — М. : Министерство природных ресурсов Российской Федерации совместно с АНО «Центр международных проектов», 2007. — 422 с.

2. **ГОСТ Р 17.4.3.07–2001.** Охрана природы. Почвы. Требования к свойствам осадков сточных вод при использовании их в качестве удобрений [Текст] ; постановление Госстандарта России от

23.01.2001 № 30-ст. — М. : Издательство стандартов, 2001.

3. Технологический регламент использования осадков сточных вод в качестве удобрения в Алтайском крае [Текст] / Л. П. Овцов [и др.]. — Барнаул : Алтайский филиал ФГУП НИИССВ «Прогресс», 2002.

Материал поступил в редакцию 20.01.09.

Кирейчева Людмила Владимировна, доктор технических наук, профессор, заместитель директора

Тел. 8 (499) 154-13-26

E-mail: kireycheva@vniigim.ru

Тиньгаев Анатолий Владимирович, кандидат технических наук, докторант

Тел. 8 (499) 154-13-26

E-mail: avtingaev@eandex.ru

УДК 502/504 : 631.145:631.6/470)

И. Г. ЮДАЕВ

ЗАО «Волгоградский завод оросительной техники и жилищно-коммунального хозяйства»

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ МЕЛИОРАТИВНОГО КОМПЛЕКСА РОССИИ

Статья посвящена одному из главных направлений развития аграрно-промышленного комплекса страны — орошению. За последние годы проблемы устойчивого производства продовольствия, сохранения плодородия почв не только не утратили своей актуальности, но в связи с постоянно возрастающей численностью населения, а также ограниченной возможностью освоения новых площадей для сельскохозяйственного производства, их деградацией еще больше обостряются. Утверждается, что без возрождения отечественного машиностроения и постановки на производство современных дождевальными машин невозможно продолжить развитие сельского хозяйства.

Орошение, мелиорация, плодородие почв, дефицит водных ресурсов, целевые индикаторы и показатели, машина нового поколения ДКШ 64А «Волжанка» М2.

The article is dedicated to one of the development directions of the agrarian and industrial complex of the country – irrigation. For the recent years problems of steady foodstuff production, conservation of soils fertility have not only lost their urgency but in connection with the constantly increasing number of population as well as limited capability of development of new areas for farming, their degradation have being aggravated. It is asserted that without revival of the domestic machine building and arrangement of manufacturing modern sprinkling machines it is impossible to continue development of the agriculture.

Irrigation, reclamation, fertility of soils, deficit of water resources, purposeful indicators and indices, machine of a new generation DKSH 64A «Volzhanka» M2.