

8. Bolotov A.G. Izmerenie temperatury pochv v polevykh usloviyakh // Sb. materialov II mezhd. nauch.-prak. konf. Antropogennoe vozdeystvie na lesnye ekosistemy. – Barnaul, 2002. – S. 148-150.

9. Bolotov A.G., Shein E.V., Makarychev S.V. Water Retention Capacity of Soils in the Altai Region. *Eurasian Soil Science*, 52 (2): 187-192 (2019). doi: 10.1134/S1064229319020030.

10. Bolotov G.A., Bekhovikh Yu.V., Semenov G.A. Opredelenie teplofizicheskikh svoystv kapillyarno-poristykh tel impulsnym metodom s ispolzovaniem tekhnologii vizualnogo programmirovaniya // *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. – 2012. – No. 6 (68). – S. 37-40.



УДК 631.445.4:504.53.06



О.В. Коваленко, Ю.Н. Сыромятников
O.V. Kovalenko, Yu.N. Syromyatnikov

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТРАНСЛОКАЦИИ
МИКРОЭЛЕМЕНТОВ-МЕТАБОЛИТОВ В СИСТЕМЕ ПОЧВА-РАСТЕНИЕ
В УСЛОВИЯХ ЕЕ ПОЛИЭЛЕМЕНТНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ТЯЖЕЛЫМИ МЕТАЛЛАМИ**

**THE MATHEMATICAL MODELING OF TRACE ELEMENT METABOLITE TRANSLOCATION
IN THE SOIL – PLANT SYSTEM UNDER THE CONDITIONS
OF ITS MULTIPLE-ELEMENT POLLUTION WITH HEAVY METALS**

Ключевые слова: микроэлементы, почва, растения, загрязнение почвы.

Keywords: trace elements, soil, plants, soil pollution.

Доказана возможность использования метода математического моделирования как одного из подходов для изучения закономерностей транслокации микроэлементов-метаболитов (Zn, Fe, Co, Mn, Cu) в системе почва-растение при различных уровнях ее техногенной нагрузки Cd, Pb, Ni, Cr в условиях микрополевого опыта на черноземе подзолистом тяжелосуглинистом. Сформулированы основные принципы построения многофакторных регрессионных моделей и дана оценка транслокации микроэлементов под действием тяжелых металлов в системе почва-растение.

This paper proves the possibility of using the method of mathematical modeling as one of the approaches to study the patterns of translocation of trace element metabolites (Zn, Fe, Co, Mn, Cu) in the soil – plant system at various levels of its technogenic load with Cd, Pb, Ni, Cr in a micro-field experiment in podzolic and heavily loamy chernozem soil. The basic principles of the construction of multivariate regression models are formulated and the translocation of trace elements under the action of heavy metals in the soil – plant system is evaluated.

Коваленко Ольга Владимировна, инженер, Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина, г. Харьков, Украина. E-mail: 7109905@gmail.com.

Сыромятников Юрий Николаевич, аспирант, Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства им. Петра Василенко, г. Харьков, Украина. E-mail: gara176@meta.ua.

Kovalenko Olga Vladimirovna, Engineer, Kharkov National University named after V.N. Karazin, Kharkov, Ukraine. E-mail: 7109905@gmail.com.

Syromyatnikov Yuriy Nikolayevich, post-graduate student, Kharkov National Technical University of Agriculture named after P.M. Vasilenko, Kharkov, Ukraine. E-mail: gara176@meta.ua.

Введение

Проблема полиэлементного загрязнения почв тяжелыми металлами и получения качественной продукции в зонах техногенного давления является актуальной [1-6]. Для эффективного анализа и выявления закономерностей накопления металлов-токсикантов, микроэлементов-метаболитов в трофических цепях необходимо, на наш взгляд, выявить взаимосвязь между факторами, определяющими направление процессов, и представить их в количественной форме – в виде математической модели.

Одной из задач исследований вопросов техногенного загрязнения системы почва-растение является разработка модели суммарного воздействия техногенного полиэлементного загрязнения почв тяжелыми металлами на процесс транслокации микроэлементов-метаболитов. Цель моделирования в исследованиях – нахождение математической формулы для имеющихся составляющих и их взаимной связи в системе почва-растение и дальнейшее их модельное и теоретическое объяснение.

Статистический уровень наших исследований имеет в основном эмпирический характер, так как разработки детальной гипотетической модели, которая объяснила бы причины вариации показателей перед началом исследования, не было. Кроме того, необходимость включения в совокупности условий большого количества показателей привела к значительным трудностям по сравнению с результатами статистического анализа, который показал, что данные содержания металлов в системе почва-растение можно описать уравнениями множественной регрессии. Это позволило выявить элементы, содержание которых выходит за пределы дефицита и избытка при полиэлементном загрязнении почвы тяжелыми металлами.

Методика и объекты

Зависимости транслокации микроэлементов-метаболитов в системе почва-растение изучались на групповых объектах методами математической статистики (дисперсионный, корреляционный, регрессивный и факторный анализы) с использованием пакета программ А.И. Новикова [7], усовершенствованных Ю.Н. Сыромятниковым [8]. Объектом исследований избран чернозем подзолистый тяжелосуглинистый Восточно-Лесостеповой возвышенной провинции Украины с смоделированными уровнями техногенного загрязнения, превышающими естественный фон по содержанию Cd, Pb, Ni, Cr в 3, 5, 10, 15 раз. Как тестовые культуры использованы суданская трава (*Soyghum vulgare sudanense*), гречка (*Fagopyrum sagittayum*), горох (*Pisum sativum var. commune*). Определение тяжелых металлов и микроэлементов-метаболитов в анализируемой системе проводилось с использованием атомно-абсорбционного метода.

Результаты и обсуждение

Использование статистических многомерных методов анализа позволило установить, что содержание цинка в растениях коррелирует с содержанием в них Cu ($r = 0,79$), Mn ($r = 0,64$), Cd ($r = 0,58$) и Cr ($r = 0,5$), а также с содержанием Cu ($r = 0,62$), Cr ($r = 0,58$), Mn ($r = 0,5$), Fe ($r = 0,5$) в почве. Лабильная форма цинка в почве связана с содержанием кислоторастворимых форм Ni ($r = 0,54$), Fe ($r = 0,5$).

Транслокация железа в растения обусловлена преимущественно фазой вегетации растений ($r = 0,9$), легкодоступными формами Cu ($r = 0,69$), Cr ($r = 0,59$), Pb ($r = 0,5$) и кислоторастворимыми формами Mn ($r = 0,6$), Zn ($r = 0,53$), Cr ($r = 0,5$), а также содержанием Cr ($r = 0,92$) в растениях.

Поступление кобальта в растения, изученное ранее, тесно связано с содержанием в них Fe ($r = 0,97$) и Cr ($r = 0,9$), фазой их вегетации ($r = 0,98$) и содержанием легкодоступных форм Co ($r = 0,85$), Mn ($r = 0,73$) в почве.

Накопление марганца тестовыми культурами связано с содержанием в них Zn ($r = 0,76$), Cr ($r = 0,62$), Cu ($r = 0,57$), Cd ($r = 0,52$), фазой вегетации ($r = 0,74$), с уровнями поступления в почву Cr ($r = 0,5$), а также с содержанием в почве легкодоступных форм Mn ($r = 0,62$), Cr ($r = 0,62$) и кислоторастворимой формы Cr ($r = 0,52$). Количество марганца в почве коррелирует с содержанием в нем легкодоступных форм Cr ($r = 0,99$), Cu ($r = 0,72$), Co ($r = 0,69$), Ni ($r = 0,67$), Zn ($r = 0,65$) и кислоторастворимых форм Fe ($r = 0,65$), Co ($r = 0,5$).

Поступление меди в растения преимущественно обусловлено фазой их вегетации ($r = 0,83$), содержанием в них Co ($r = 0,82$), Zn ($r = 0,82$), Mn ($r = 0,5$), а также содержанием в почве кислоторастворимых форм Cu ($r = 0,51$), Cr ($r = 0,43$) и легкодоступных форм Cu ($r = 0,73$), Cr ($r = 0,48$). Легкодоступные формы меди в почве связаны с кислоторастворимыми формами Fe ($r = 0,66$), Mn ($r = 0,64$), Co ($r = 0,51$), Cu ($r = 0,5$) и легкодоступными формами Cr ($r = 0,66$), Co ($r = 0,51$), Cu ($r = 0,5$), Mn и Pb ($r = 0,5$) в почве.

По данным регрессионного анализа установлено, что урожайность растений зависит в большинстве случаев от содержания в них микроэлементов-метаболитов, то есть элементов, жизненно необходимых для нормального их развития: Mn ($r = 0,71$), Fe ($r = 0,7$), Co ($r = 0,58$), Cu ($r = 0,5$), от уровня поступления в почву фоновых количеств загрязнителей: Cr ($r = 0,59$), Cd ($r = 0,5$) и их содержания в растениях ($r = 0,55$; $r = 0,66$). Особенно тесная связь выявлена с наличием в почве таких легкодоступных растениям форм металлов, как Cr ($r = 0,62$), Mn ($r = 0,59$), Ni ($r = 0,58$) и несколько меньше Cd ($r = 0,5$), а также кислоторастворимых форм Ni ($r = 0,62$), Cr ($r = 0,54$).

Поскольку в публикациях по изучению транслокации микроэлементов нет ссылок на выбор адекватной естественному процессу модели, эм-

пирическим путем установлено, что целесообразнее использовать многофакторные регрессионные модели [9, 10]. Результатом математической обработки полученных данных стала десятифакторная полная квадратичная регрессионная модель [11], которая устанавливает формы зависимости, функции регрессии и дает оценку неизвестным значениям зависимой переменной в системе почва-растение при моделировании уровней загрязнения почвы тяжелыми металлами [12-15].

Полная квадратичная модель содержит в себе 65 параметров и 10 факторов (Cd, Pb, Ni, Cr, Мд, x_1 , x_2 , P_p , t , K_u) и имеет такой общий вид:

$$y = a_0 + \sum a_i x_i + \sum a_{i2} x_i^2 + \sum a_{i3} x_i x_j.$$

Для рассматриваемых в системе почва-растение микроэлементов-метаболитов и тяжелых металлов получены следующие уравнения (1)-(5):

$$Zn_R = 101,41 + 2,68Zn_{buf} + 9,55P_p - 83,3t + 12,79t^2 + 2,32Zn_{buf}t - 1,71Zn_{buf}K_u - 0,203CdZn_{buf} - 0,785CrP_p - 4,66Zn_{buf}P_p + 2,08Zn_{buf}t + 0,944Cr_t + 3,89P_pK_u - 0,014CrM_d;$$

$$R = 0,804; F(13,188) = 26,57; F_{st} = 1,76; (1)$$

$$Co_R = 7,68 - 0,82P_p^2 + 0,24tK_u - 0,24K_u^2 + 3,68P_p - 0,72Co_{HCL}P_p - 1,83Co_{HCL} - 6,15t + 0,77t^2 + 1,3Co_{HCL}t;$$

$$R = 0,794; F(9,192) = 36,45; F_{st} = 1,93; (2)$$

$$Fe_R = 3066,39 - 2489,99P_p + 485,32P_p^2 + 6,53Fe_{buf}K_u;$$

$$R = 0,91; F(3,198) = 318,45; F_{st} = 2,65; (3)$$

$$Mn_R = -314,6 - 15,08P_p t - 18,22P_p K_u - 0,59Mn_{HCL}K_u + 355,941K_u - 40,52K_u^2 - 21,18tK_u + 0,27Mn_{HCL}t + 151,84P_p - 27,15P_p^2;$$

$$R = 0,708; F(9,192) = 21,55; F_{st} = 1,93; (4)$$

$$Cu_R = 9,62 - 5,34t + 1,12t^2;$$

$$R = 0,474; F(2,199) = 28,86; F_{st} = 3,04; (5)$$

где Cd, Pb, Ni, Cr – превышение кларков исследуемых металлов по схеме опыта;

t – время отбора образцов;

P_p – органы растений;

M_d – минеральные удобрения;

x_1 – содержание исследуемого элемента в буферной вытяжке из почвы;

x_2 – содержание элемента в кислоторастворимой вытяжке из почвы;

K_u – исследуемая культура.

Построенная нами модель позволяет выявить многочисленные явления взаимодействия металлов в почве и растениях, которые характеризуются изменчивостью и разнородностью проявления в системе, и описать их ограниченным количеством факторов влияния. Так, нами установлено, что содержание цинка в растениях определяется превышением фонового уровня в почве хрома и кадмия, содержанием подвижной формы цинка в почве, видом выращиваемой культуры, а также периодом ее вегетации. Содержание других исследованных микроэлементов (Co, Fe, Mn) в растениях связано с их содержанием в почве, видом выращиваемой культуры, распределением металлов в органах растений по времени (Cu, Mn). Концентрация других металлов-токсикантов (Pb, Ni, Cd, Cr) в растениях тесно связана с содержанием их в почве, распределением в органах растений, видом выращиваемой культуры. Прослеживается также связь содержания металлов в почве с внесенным их количеством.

С целью дальнейшей детализации полученной информации построили пятифакторную полную квадратичную регрессионную модель, которая содержит превышение местных кларков Cd, Pb, Ni, Cr и фактор времени. Результатом стали такие уравнения (6)-(20), описывающие прочность, тесноту и форму связи между исследуемыми параметрами для суданской травы (r_1), гречки (r_2) и гороха (r_3):

$$Zn_{r1} = 61,92 - 46,6t + 10,69t^2 + 5,77Cr - 0,73Cr^2 + 0,31CuNi - 0,38Cut - 0,29Nit; \quad (6)$$

$$R = 0,96; F(7,31) = 46,15; F_{st} = 2,31;$$

$$Zn_{r2} = 87,15 + 1,08Cr - 59,5t + 14t^2 - 0,11PbNi - 0,05Cr^2 - 0,16Cut;$$

$$R = 0,93; F(6,38) = 41,4; F_{st} = 2,35; \quad (7)$$

$$Zn_{r3} = 106,6 - 56,8t + 10,3t^2 - 3,19Cu + 0,17Cu^2;$$

$$R = 0,9; F(1,40) = 45,0; F_{st} = 4,08; \quad (8)$$

$$Co_{r1} = 2,98 + 0,92t^2 - 3,17t;$$

$$R = 0,98; F(2,36) = 459,9; F_{st} = 3,26; \quad (9)$$

$$Co_{r2} = 6,76 - 4,27t + 0,83t^2 + 0,008CuCr;$$

$$R = 0,94; F(3,41) = 113,13; F_{st} = 2,83; \quad (10)$$

$$Co_{r3} = 2,52 + 0,59t^2 - 1,83t - 0,01Nit + 0,27Cr - 0,071Cr - 0,007Cr^2;$$

$$R = 0,71; F(6,38) = 6,35; F_{st} = 2,35; \quad (11)$$

$$Fe_{r1} = 414,11 + 136,7t^2 - 459,49t;$$

$$R = 0,98; F(2,36) = 491,84; F_{st} = 3,26; \quad (12)$$

$$Fe_{r2} = 574,83 - 352,16t + 59,67t^2;$$

$$R = 0,94; F(2,42) = 155,52; F_{st} = 3,22; \quad (13)$$

$$Fe_{r3} = 259,36 - 165,27t + 31,43t^2 + 1,09Cr - 0,46NiCr;$$

$$R = 0,87; F(4,40) = 30,57; F_{st} = 2,61; \quad (14)$$

$$Mn_{r1} = 104,23 + 12,29Cr - 1,04Cr^2 + 22,32t^2 - 84,25t - 1,6Cr;$$

$$R = 0,88; F(5,33) = 22,29; F_{st} = 2,49; \quad (15)$$

$$Mn_{r2} = 437,74 - 286,09t + 50,28t^2 + 31,28Pb - 1,28Pb^2 - 4,12Pb - 0,76NiCr;$$

$$R = 0,95; F(6,38) = 57,28; F_{st} = 2,35; \quad (16)$$

$$Mn_{r3} = 69,64 + 94,3t - 20,31t^2 + 0,56Cr - 0,19Cr^2 + 2,61Cr;$$

$$R = 0,97; F(5,39) = 134,22; F_{st} = 2,45; \quad (17)$$

$$Cu_{r1} = 10,54 - 6,23t + 1,13t^2 + 0,03NiCr + 0,08Cr;$$

$$R = 0,88; F(4,34) = 30,66; F_{st} = 2,65; \quad (18)$$

$$Cu_{r2} = 6,34 - 1,53t + 0,36Cr - 0,02Cr^2;$$

$$R = 0,8; F(3,41) = 23,68; F_{st} = 2,83; \quad (19)$$

$$Cu_{r3} = 8,81 - 4,17t - 0,41Cr + 0,77t^2 + 0,01Cr^2 + 0,04Cr;$$

$$R = 0,89; F(5,39) = 28,39; F_{st} = 2,45. \quad (20)$$

При этом значение F-критерия Фишера в десятифакторной и пятифакторной моделях взято при уровнях значимости $\alpha = 5\%$.

Анализируя полученные пятифакторные и десятифакторные модели, можно констатировать, что при повышении концентрации Cd, Pb, Ni и Cr в почве их поступление, а также транслокация микроэлементов-метаболитов (Zn, Fe, Cu, Co, Mn) в растении нелинейно зависят от превышения кларков металлов в почве, что подтверждается коэффициентами детерминации. Последние дают право считать, что показатели содержания тяжелых металлов и металлов-метаболитов в растениях достаточно тесно связаны ($r > 0,5$), а в случае поступления Cd, Ni, Pb, Cr в растения – сильно связаны ($r > 0,7$) с варьированием уровней поступления металлов в почву и фактором времени, что наглядно подтверждает прочность влияния факторов на результативный признак. Кроме того,

четко прослеживается специфика выращиваемой культуры, которая проявляется в разном уровне накопления металлов-токсикантов и разных причинах, обуславливающих данное явление. Так, зависимость поступления того или иного металла-токсиканта, как и микроэлементов-метаболитов в тестовые культуры в каждом конкретном случае своя, что подтверждается полученными моделями.

Поступление микроэлементов-метаболитов в тестовые культуры связано преимущественно с разным уровнем поступления металлов-токсикантов (Cd, Pb, Ni, Cr) в течение вегетационного периода, с взаимодействием металлов-токсикантов с микроэлементами в почвенном растворе.

Выводы

1. Благодаря использованию многомерных методов статистического анализа установлено, что содержание микроэлементов-метаболитов в системе почва-растение – это переменный признак, который представляет собой функцию многих переменных и множества факторов, влияющих на этот признак. Используемые виды анализа информации позволяют утверждать, что зависимости в анализируемой системе имеют не функциональный, а статистический характер.

2. С помощью метода математического моделирования разработаны десяти- и пятифакторные регрессионные модели суммарного воздействия техногенного полиэлементного загрязнения почвы тяжелыми металлами на процессы транслокации микроэлементов, что позволило найти математическую формулу для имеющих составляющих и их взаимной связи в системе почва-растение, а также перейти от аналитического изучения отдельных функций и процессов к синтетическому познанию целостности системы почва-растение, предвидеть возможные изменения одного признака на основе известных изменений другого.

3. Результаты математического моделирования показывают, что зависимости транслокации микроэлементов-метаболитов, тяжелых металлов в тестовые культуры в условиях техногенеза не идентичные, а специфические. Тяжелые металлы

влияют не столько количеством элементов, которые поступают в почву, сколько изменением их соотношения в почве, которое стимулируется данным влиянием.

4. Определение связей в системе почва-растение при транслокации микроэлементов и тяжелых металлов имеет большое значение для теоретического обоснования возможных уровней техногенных нагрузок на агроэкосистемы в условиях техногенного прессинга с целью оценки уровней поступления тяжелых металлов, нормирования загрязнителей и получения продукции агроценозов надлежащего качества.

Библиографический список

1. Борисочкина Т.И., Водяницкий Ю.Н. Загрязнение агроландшафтов России тяжелыми металлами: источники, масштабы, прогнозы // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. – 2007. – № 60.
2. Капралова О.А. и др. Влияние загрязнения тяжелыми металлами на эколого-биологические свойства почв г. Ростова-на-Дону // Научная мысль Кавказа. – 2012. – № 1. – С. 13-13.
3. Водяницкий Ю.Н. Формулы оценки суммарного загрязнения почв тяжелыми металлами и металлоидами // Почвоведение. – 2010. – № 10. – С. 1276-1280.
4. Фадеев А.И., Мирошниченко Н.Н., Самохвалова В.Л. Миграция, транслокация и фитотоксичность тяжелых металлов при полиэлементном загрязнении почв // Агрехимия. – 2001. – № 3. – С. 57-61.
5. Жигарева Т.Л. и др. Влияние природных мелиорантов и тяжелых металлов на урожайность зерновых культур и микрофлору дерново-подзолистой почвы // Агрехимия. – 2005. – № 11. – С. 60-65.
6. Карпучин М.М., Ладонин Д.В. Влияние компонентов почвы на поглощение тяжелых металлов в условиях техногенного загрязнения // Почвоведение. – 2008. – № 11. – С. 1388-1398.
7. Новиков А.И. Эконометрика: учебное пособие. – М.: Дашков и К°, 2017. – 223 с.

8. Сыромятников Ю.Н. – Режим доступа: URL: <https://orcid.org/0000-0001-9502-626X>.
9. Лакин Г.Ф. Биометрия. – М.: Высшая школа, 1990. – 352 с.
10. Математическое моделирование в биологии и химии. Новые подходы: сб. науч. тр. / отв. ред. Р.Г. Хлеборос; Рос. акад. наук. Сиб. отд. – Новосибирск: Наука; Сиб. отд., 1992. – 219 с.
11. Егоршин А.А., Малеянец Л.М. Корреляционно-регрессионный анализ. – Харьков: Основа, 1998. – 201 с.
12. Задорин А.Д., Рубинштейн М.И., Юмагулова А.Н., Андрейчук А.Л. О моделировании связей в системе почва-растение // Почвоведение. – 1982. – № 8. – С. 142-145.
13. Марчук Г.И. Математическое моделирование и охрана природы // Природа. – 1985. – № 7. – С. 6-12.
14. Математические модели рационального природопользования: Сб. науч. тр. / отв. ред. В.В. Пененко, И.Б. Токин; АН СССР, Сиб. отд. – Новосибирск: Наука, Сиб. отд., 1989. – 137 с.
15. Пененко В.В., Алоян А.Е. Модели и методы для задач охраны окружающей среды / отв. ред. М.М. Лаврентьев. – Новосибирск: Наука; Сиб. отд., 1985. – 256 с.
4. Fadeev A.I., Miroshnichenko N.N., Samokhvalova V.L. Migratsiya, translokatsiya i fitotoksichnost tyazhelykh metallov pri polielementnom zagryaznenii pochv // Agrokhimiya. – 2001. – No. 3. – S. 57-61.
5. Zhigareva T. L. i dr. Vliyanie prirodnykh meliorantov i tyazhelykh metallov na urozhaynost zernovykh kultur i mikrofloru dernovo-podzolistoy pochvy // Agrokhimiya. – 2005. – No. 11. – S. 60-65.
6. Karpukhin M.M., Ladonin D.V. Vliyanie komponentov pochvy na pogloshchenie tyazhelykh metallov v usloviyakh tekhnogenogo zagryazneniya // Pochvovedenie. – 2008. – No. 11. – S. 1388-1398.
7. Novikov A.I. Ekonometrika: uchebnoe posobie. – М.: Dashkov i K°, 2017. – 223 s.
8. Syromyatnikov Yu.N. [Elektronnyy resurs]. – URL: <https://orcid.org/0000-0001-9502-626X>.
9. Lakin G.F. Biometriya. – М.: Vysshaya shkola, 1990. – 352 s.
10. Matematicheskoe modelirovanie v biologii i khimii. Novye podkhody: Sb. nauch. tr. / Ros. akad. nauk. Sib. otd.; Otv. red. R.G. Khleboros. – Novosibirsk: Nauka, Sib. otd., 1992. – 219 s.
11. Yegorshin A.A., Malyarets L.M. Korrelyatsionno-regressionnyy analiz. – Kharkov: Osnova, 1998. – 201 s.
12. Zadorin A.D., Rubinshteyn M.I., Yumagulova A.N., Andreychuk A.L. O modelirovanii svyazey v sisteme pochva-rastenie // Pochvovedenie. – 1982. – No. 8. – S. 142-145.
13. Marchuk G.I. Matematicheskoe modelirovanie i okhrana prirody // Priroda. – 1985. – No. 7. – S. 6-12.
14. Matematicheskie modeli ratsionalnogo prirodopolzovaniya: Sb. nauch. tr. / AN SSSR, Sib. otd.; otv. red. V.V. Penenko, I.B. Tokin. – Novosibirsk: Nauka, Sib. otd., 1989. – 137 s.
15. Penenko V.V., Aloyan A.Ye. Modeli i metody dlya zadach okhrany okruzhayushchey sredy / otv. red. M.M. Lavrentev. – Novosibirsk: Nauka, Sib. otd., 1985. – 256 s.

References

1. Borisochkina T.I., Vodyanitskiy Yu.N. Zagryaznenie agrolandshaftov Rossii tyazhelymi metallami: istochniki, masshtaby, prognozy // Byulleten Pochvennogo instituta im. V.V. Dokuchaeva. – 2007. – No. 60.
2. Kapralova O.A. i dr. Vliyanie zagryazneniya tyazhelymi metallami na ekologo-biologicheskie svoystva pochv g. Rostova-na-Donu // Nauchnaya mysl Kavkaza. – 2012. – No. 1. – S. 13-13.
3. Vodyanitskiy Yu.N. Formuly otsenki summar-nogo zagryazneniya pochv tyazhelymi metallami i metalloidami // Pochvovedenie. – 2010. – No. 10. – S. 1276-1280.

