

Ефремов И.В., Горшенина Е.Л., Солопова В.А., Рахимова Н.Н., Рябых Е.И., Чернова О.Н.
Оренбургский государственный университет
E-mail: bgd@mail.osu.ru

КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА МИГРАЦИОННОЙ СПОСОБНОСТИ И РИСКА ЗАГРЯЗНЕНИЯ ТЯЖЕЛЫМИ МЕТАЛЛАМИ КОМПОНЕНТОВ ПОЧВЕННО-РАСТИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Исследования физико-химических свойств почв, выполняемые в последние годы, привели к накоплению значительного экспериментального материала по содержанию в них тяжелых металлов, пестицидов, биогенных и других соединений. Прогнозирование изменений качественного состава почв и содержания в них токсичных элементов, представляет собой весьма сложную задачу, для решения которой применяют методы математического моделирования.

В работе, при рассмотрении процессов переноса веществ и, в частности, тяжелых металлов по компонентам почвенно-растительных систем предполагалось, что данный процесс носит вероятностный характер. В качестве второго предположения мы приняли независимость текущего состояния компонентов системы от его предыдущего состояния. Это позволило нам рассматривать почвенно-растительную систему как марковскую цепь с конечным числом состояний. Вероятности того или иного состояния определялись интенсивностями переходов веществ по компонентам системы. На основе построенной математической модели и проведенных аналитических исследований, рассчитаны риски загрязнения почвы, надземной и корневой систем растений тяжелыми металлами. Предложенные авторами дифференциальные и интегральные показатели соответственно характеризуют распределение того или другого металла в почвенно-растительной системе и общее распределение всех тяжелых металлов в конкретной почвенно-растительной системе.

На основании проведенных теоретических и экспериментальных исследований предложены комплексные показатели для оценки миграционной способности тяжелых металлов в почвенно-растительных системах.

Ключевые слова: почвенно-растительные системы, моделирование, риск, загрязнения тяжелыми металлами, интегральный дифференциальный показатель.

В настоящее время оценку экологического состояния почв и растений оценивают на основе аналитических исследований уровня концентраций того или иного загрязняющего вещества в компонентах природной среды. Исследования физико-химических свойств почв, выполняемые в последние годы, привели к накоплению значительного экспериментального материала по содержанию в них тяжелых металлов, пестицидов, биогенных и других соединений [1]–[3]. Прогнозирование изменений качественного состава почв, содержания в ней токсичных элементов, представляет собой весьма актуальную и сложную задачу, для решения которой применяют методы математического моделирования. Например, концентрации тяжелых металлов в компонентах почвенно-растительных систем (почва, корневая система, надземная часть растений) являются важной количественной характеристикой экологического состояния систем, вместе с тем, проведение таких исследований достаточно дорогостоящее и затратное мероприятие [4]–[6], [9]–[11], [13]. Кроме того, концентрации тяжелых металлов меняются с течением времени и зависят от возможных антропогенных загрязне-

ний. Необходима разработка таких показателей экологической оценки почвенно-растительных систем, которые не меняются во времени и позволяют рассчитывать концентрации тяжелых металлов в любом из компонентов почвенно-растительных систем по данным о концентрации лишь в одном [7]–[8], [12], [14]–[16].

Материалы и методы исследования

Одним из методов, позволяющих прогнозировать концентрацию загрязнителя в компонентах системы (почва – корневая система – надземная часть растений) является метод, основанный на вероятностном рассмотрении процесса накопления тяжелых металлов в ее компонентах.

Рассмотрим систему, состоящую из следующих компонентов: почва, корневая система, надземная часть растения. Такую систему можно отнести к саморегулирующимся системам, сформированным в процессе эволюции как системы в целом, так и отдельных ее компонентов. Компоненты системы являются взаимосвязанными.

В процессе взаимодействия компонентов системы друг с другом происходит перенос ма-

терии и энергии. Определим начальные условия следующим образом: 1) в начальный момент времени в систему (например, через атмосферу) введена C_0 концентрация загрязняющего вещества; 2) между компонентами системы существует обмен веществом с различными интенсивностями:

λ_1 - интенсивность перехода вещества из почвы в корневую систему;

λ_2 - интенсивность перехода вещества из корневой системы в надземную часть растения;

λ_3 - интенсивность перехода вещества из надземной части растения в почву.

Будем характеризовать состояние системы вероятностями P нахождения загрязняющего вещества в составных частях системы:

P_{Π} – вероятность нахождения загрязнителя в почве;

P_{κ} – вероятность нахождения загрязнителя в корневой системе растений;

P_{H} – вероятность нахождения загрязнителя в надземной части растений.

Сформулируем задачу следующим образом: определить концентрацию загрязняющего вещества, установившуюся в каждом из компонентов системы при условии стационарности интенсивностей перехода загрязняющего вещества из одного компонента в другой, при стремлении времени наблюдения в бесконечность. В работе [17] приведена система уравнений, описывающая вероятности нахождения тяжелых металлов в компонентах системы, решением которой являются соотношения:

$$\begin{aligned} C_{\Pi} &= \frac{\lambda_1 \lambda_2 C_0}{\lambda_1 \lambda_2 + \lambda_2 \lambda_3 + \lambda_3 \lambda_1}; \\ C_{\kappa} &= \frac{\lambda_1 \lambda_3 C_0}{\lambda_1 \lambda_2 + \lambda_2 \lambda_3 + \lambda_3 \lambda_1}; \\ C_H &= \frac{\lambda_2 \lambda_3 C_0}{\lambda_1 \lambda_2 + \lambda_2 \lambda_3 + \lambda_3 \lambda_1}. \end{aligned} \quad (1)$$

Полученные уравнения позволяют по известным интенсивностям переходов веществ в системе почва-растение определять преимущественное распределение веществ в подсистемах. Следует отметить, что интенсивности переходов определяются свойствами почв и растений.

Для интегральной оценки почвенно-растительных комплексов предложен показатель, учитывающий физико-химические свойства почв и растений. В качестве такого критерия выбран знаменатель в уравнениях (1).

Для идентификации параметров модели проведены аналитические исследования на содержание тяжелых металлов в компонентах основных почвенно-растительных системах Оренбургской области (почва, корневая система растений, надземная часть растений). Участки для отбора проб почв имели размер примерно 100 квадратных метров, с однородными почвенно-растительными комплексами, типичными по основным признакам для данного района: тип почвы, рельеф. Пробы отбирали методом конверта, с последующим перемешиванием пробы и отбору необходимого для анализа количества. Пробы растений отбирались на тех же участках, что и пробы почвы. Надземную часть растений срезали ножом и укладывали в пакет с этикеткой. Если нижняя часть растения была загрязнена почвой, то растения срезали на 3 - 5 см выше поверхности почвы.

Отобранные точечные пробы растений собирали на брезент, тщательно перемешивали и расстилали ровным слоем, получая, таким образом, объединенную пробу.

Для исследования почвенного покрова Оренбургской области были взяты, с учетом их распространенности, следующие почвы: чернозем обыкновенный, типичный, южный и почва темно-каштановая неполноразвитая.

Интенсивность перехода тяжелых металлов из одного компонента почвенно-растительной системы в другой определялась по следующим формулам:

$$\lambda_1 = \frac{C_{\kappa}}{C_{\Pi}}; \lambda_2 = \frac{C_H}{C_{\kappa}}; \lambda_3 = \frac{C_{\Pi}}{C_H}, \quad (2)$$

где C_{κ} , C_{Π} , C_H – концентрации тяжелых металлов в корневой системе растений, почве, надземной части растений соответственно.

Параметры интенсивности имеют простой физический смысл, они показывают направление и интенсивность перехода тяжелых металлов по компонентам системы. Так, например, λ_1 показывает степень миграции тяжелых металлов из почвы в корневую систему растений.

Если $\lambda_1 > 1$, то в корнях концентрация тяжелых металлов выше чем в почве (т. е. происходит накопление тяжелых металлов в корневой системе) и наоборот если $\lambda_1 < 1$, то накопление тяжелых металлов происходит в почве.

Соответственно:

λ_2 – показывает перенос тяжелых металлов из корневой системы растений в надземную часть;

λ_3 – перенос тяжелых металлов из надземной части в почву.

Результаты исследования

На основе рассчитанных интенсивностей определены риски загрязнения почвы, надземной части растений и корневой системы. Пример данных по риску загрязнения надземной части растений подвижными формами микроэлементов представлен на рисунке 1.

В целом риск загрязнения надземной части растений тяжелыми металлами незначителен для большинства почвенно-растительных систем.

Риск загрязнения корневой системы представлен на рисунке 2. Максимум и минимум вероятности загрязнения цинком корневой системы отмечено у цикория, татарника, одуванчика на черноземе обыкновенном (0,66) и черноземе типичном (0,07) соответственно. А молибден и серебро очень интенсивно накапливаются в корневой системе растений.

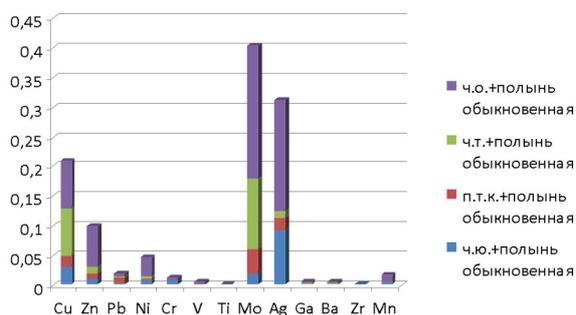


Рисунок 1. Риск загрязнения тяжелыми металлами надземной части растений

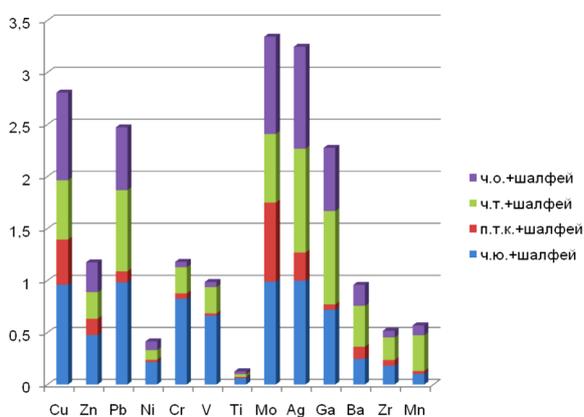


Рисунок 2. Риск загрязнения тяжелыми металлами корневой системы растений

Как видно из результатов, одни почвенно-растительные системы с одним и тем же растением характеризуются максимальным значением риска, а на других почвенно-растительных системах с тем же растением - минимальное. Это связано с влиянием почвенных факторов, характерных для каждого типа почв на накопление микроэлементов в растениях. При этом основное количество микроэлементов содержащихся в почве аккумулируется в корневой системе растений и лишь небольшая доля – в надземной части растений.

Риск загрязнения почвы представлен на рисунке 3.

Обсуждение результатов исследования

На основе проведенных аналитических исследований проб почв, корней и надземной части растений получены данные об интенсивностях переходов тяжелых металлов по компонентам системы и отмечены металлы, которые преимущественно накапливаются в корневой системе, в надземной части некоторых растений. Практически все металлы накапливаются в почвенном покрове. Только серебро и молибден на некоторых почвенно-растительных системах аккумулируются в растениях.

Сравнительный анализ рисков загрязнения почвенно-растительных систем тяжелыми металлами показал, что наименьший риск загрязнения характерен для надземной части растений. Риск загрязнения компонентов почвенно-растительных систем тяжелыми металлами значительно отличается для наземной части растений, корневой системы и почвы. В целом риск загрязнения надземной части растений тяжелыми металлами незначителен для большинства почвенно-растительных систем. Риск

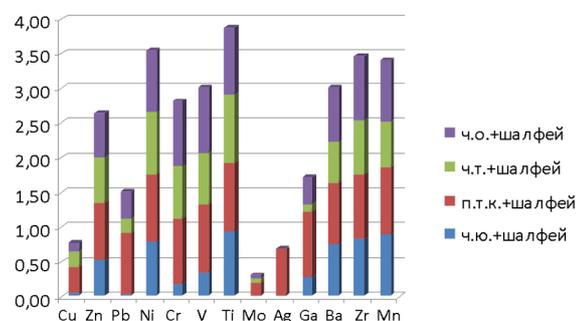


Рисунок 3. Риск загрязнения тяжелыми металлами почвы

загрязнения корневой системы растений варьирует от нескольких процентов до значительных величин, достигающих почти ста процентов для отдельных металлов и почвенно-растительных систем. Риск загрязнения почвы так же лежит в диапазоне от нескольких процентов до ста. Исключение составляют молибден и серебро, которые в почве практически не аккумулируются, за исключением отдельных почвенно-растительных систем.

Как следует из результатов миграция тяжелых металлов в компонентах системы зависит как от типа почв, так, и от вида растений.

Дифференциальные показатели рассчитываются для каждого тяжелого металла по формуле

$$I = \lambda_1 \cdot \lambda_2 + \lambda_2 \cdot \lambda_3 + \lambda_1 \cdot \lambda_3 . \quad (3)$$

Дифференциальный показатель I характеризует неравномерность распределения каждого из тяжелых металлов в системе почва - корневая система - надземная часть растений. Так, при равномерном распределении металла по компонентам системы этот показатель равен 3. Чем больше отличается показатель от этой величины, тем более неравномерно распределен тот или иной металл в системе почва-растение.

Результаты расчетов приведены в таблице 1 (фрагмент). Как следует из результатов:

– медь, цинк, никель достаточно равномерно распределены по компонентам почвенно-растительных систем;

– свинец, хром, ванадий, титан, молибден, галлий, барий, цирконий, марганец характеризуются показателями, значительно отличающимися от показателя для равномерного распределения;

– самым значительным показателем неравномерности распределения характеризуется серебро (значение варьирует от 3,1 до 1101).

Интегральный показатель рассчитывается как среднее значение для всех металлов данной почвенно-растительной системы и характеризует среднее значение дифференциального показателя для каждого металла данной почвенно-растительной системы.

Минимальное значение интегрального показателя равно трем, что означает равномерное распределение всех металлов по компонентам данной почвенно-растительной системы. Из данных следует, что почвенная система южный чернозем+цикорий обладает самым равномерным распределением тяжелых металлов по компонентам системы. Большое значение интегрального показателя отмечено для почвен-

Таблица 1 (фрагмент). Значение дифференциального показателя

почва	растения	Cu	Zn	Pb	Ni	Cr	V	Ti	Mo
чернозем южный	шалфей	18,1	6,5	72,7	9,3	37,7	28,3	63,7	33,0
	татарник	4,1	6,9	20,2	5,6	45,8	31,9	37,1	16,6
	цикорий	4,4	5,2	8,9	6,5	7,5	12,0	26,3	13,7
	полынь обыкновенная	6,2	5,9	27,2	8,8	8,5	56,4	40,9	34,5
	тысячелистник	4,8	6,2	12,8	8,2	34,0	42,6	40,0	18,5
	одуванчик	5,7	6,1	11,5	9,2	57,9	43,9	39,8	24,5
	клевер луговой	6,1	9,2	28,3	7,4	33,3	40,8	42,9	4,8
	солодка	4,9	11,1	25,2	10,0	60,0	45,7	59,1	12,8
чернозем обыкновенный	шалфей	3,2	8,7	13,6	20,5	22,7	28,6	77,5	5,0
	татарник	3,4	5,9	6,5	8,7	11,2	45,5	47,6	15,7
	цикорий	7,4	4,1	6,0	9,6	15,2	23,5	49,4	9,9
	полынь обыкновенная	9,3	6,2	11,0	9,7	54,5	13,3	42,3	34,0
	тысячелистник	8,6	5,3	6,1	8,4	115,4	10,1	32,6	28,6
	одуванчик	10,1	6,0	5,8	7,0	12,3	6,9	18,9	19,8
	клевер луговой	4,0	9,6	9,3	10,0	10,1	12,9	48,6	3,9
	солодка	3,4	4,1	9,4	12,6	15,3	29,7	50,6	4,4

но-растительных систем: чернозем обыкновенный+тысячелистник (показатель равен 128,6), чернозем типичный+клевер луговой (показатель равен 108,8). При этом можно выделить три группы почвенно-растительных систем со схожими свойствами по отношению к тяжелым металлам.

Выводы

1. На основе рассчитанных рисков загрязнения почвенно-растительных систем тяжелыми металлами для характеристики неоднородности распределения конкретного металла по компонентам системы предложен дифференци-

альный показатель. Проведено ранжирование почвенно-растительных систем, в результате которого выделен ряд систем, с неоднородным распределением тяжелых металлов.

2. Для комплексной оценки неравномерности распределения металлов по компонентам почвенно-растительной системы предложен интегральный показатель, который характеризует неоднородность распределения всех в совокупности металлов по компонентам системы. С помощью этого показателя выделено три группы почвенно-растительных систем с равномерным, промежуточным и неравномерным распределением металлов по компонентам.

Список литературы:

- 1 Кучеренко В.Д., Солнцева А.Е. Оренбургская область. Агрохимическая характеристика почв СССР. Районы Урала. М., 1964. С. 289-318
- 2 Кучеренко В.Д. Почвы Оренбургской области. Челябинск: Юж. Урал. кн. изд-во. 1972
- 3 Кучеренко В.Д., Черняхов П.Г. Микроэлементы в почвах Оренбургской области. 1973. С. 96-100
- 4 Ветров А.С., Попов Н.В. География Оренбургской области. Южно-Уральское книжное издательство. 1971. С. 12-15
- 5 Географический атлас Оренбургской области / Науч. ред. и сост. А.А. Чибилев. – М.: Изд-во ДиК: Оренб. кн. изд-во, 1999. – 95 с.
- 6 Климентьев А.Н. Сельскохозяйственное освоение черноземных степей Оренбуржья// География, экономика и экология Оренбуржья. Оренбург. 1994. С. 19-28
- 7 Попов А.В. Сорные растения Оренбургской области. – Оренбург: Изд-во ОГПУ, 1997. – 237 с.
- 8 Янчук Е.Л. Комплексная оценка элементного статуса биогеоценозов в геотехнических системах Южного Урала. Дисс. соиск. уч.ст. канд.техн. наук. Оренбург. 2004.
- 9 Блохин Е.В. Материалы по структуре почвенного покрова Оренбургской области и его агроэкологическая оценка. Оренбург. 1993.
- 10 Блохин Е.В. Экология почв Оренбургской области. Екатеринбург. 1997. С.217
- 11 Блохин Е.В., Чуянов Д.А. Метод фитоиндикации в экологическом мониторинге условий окружающей среды. – Оренбург: Изд. Центр ОГАУ, 2002. – 84 с.
- 12 Ерохина А.Н. Почвы Оренбургской области. М.: Изд-во АН СССР. 1959. С.56
- 13 Добровольский Г.В. Тяжелые металлы: загрязнение окружающей среды и глобальная геохимия. Тяжелые металлы в окружающей среде. М.: Изд-во МГУ, 1980. С3-12
- 14 Lux W., Piening H. Distribution patterns of heavy metals in the soils of Hamburg and calculation of 100-years-emission. (Abstr.) 3 rd Int. Symp. Environ. Geochem/ and Health Uppsala, 16-19, Sept., 1991/Rapp. Och. Medd// Sver. geol. undrsokn. 1991, №69
- 15 Израэль Ю.А. Экология и контроль состояния природной среды. М., 1984. 560с.
- 16 Fransek Mark A. Soil lead levels in a small town environment: A case study from Mt. Pleasant-Michigan. Environ. Pollut. 1992. Vol. 76, №3. P. 251-257.
- 17 Ефремов И.В. Моделирование почвенно-растительных систем. М.: Изд-во URSS, 2008.-152 с.

Сведения об авторах:

Ефремов Игорь Владимирович, заведующий кафедрой безопасности жизнедеятельности Оренбургского государственного университета, доктор биологических наук, доцент

Горшенина Екатерина Леонидовна, доцент кафедры безопасности жизнедеятельности Оренбургского государственного университета, кандидат технических наук, доцент

Солопова Валентина Александровна, доцент кафедры безопасности жизнедеятельности Оренбургского государственного университета, кандидат технических наук, доцент

Рахимова Наталья Николаевна, доцент кафедры безопасности жизнедеятельности Оренбургского государственного университета, кандидат технических наук

Рябых Елена Ивановна, преподаватель кафедры безопасности жизнедеятельности Оренбургского государственного университета

Чернова Ольга Николаевна, преподаватель кафедры безопасности жизнедеятельности Оренбургского государственного университета

460018, г. Оренбург, пр-т Победы 13, ауд. 3409, тел. (3532) 372541, e-mail: bgd@mail.osu.ru