

## Математические структурные взаимосвязи между содержанием тяжёлых металлов и свойствами почв как фактор корректировки моделей плодородия почв

*В.Н. Гукалов, к.с.-х.н., В.И. Савич, д.с.-х.н., профессор, С.А. Измайлова, магистр, ФГБОУ ВПО РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева; А.В. Филиппова, д.б.н., профессор, ФГБОУ ВПО Оренбургский ГАУ*

Загрязнение тяжёлыми металлами в значительной степени снижает плодородие почв и урожай сельскохозяйственных культур [1–4]. При этом меняются свойства почв [5, 6]. Для оптимизации почвенного режима разрабатываются способы уменьшения подвижности тяжёлых металлов в почвах [7–9].

В то же время подвижность тяжёлых металлов в почвах и их усвояемость растениями в значительной степени зависят от взаимосвязей свойств почв [10, 11], в т.ч. от подвижности поливалентных катионов с агрохимическими и физико-химическими свойствами почв. Регулируя эти взаимосвязи, можно уменьшить негативное влияние тяжёлых металлов на компоненты экологической системы.

**Объекты и методы исследования.** Объектом исследования были выбраны выщелоченные чернозёмы Краснодарского края глинистого гранулометрического состава.

Методика исследования состояла в оценке взаимосвязей содержания валовых и подвижных форм Zn, Pb, Mn в почвах на разных элементах ландшафта с физико-химическими и агрохимическими свойствами этих почв [12]. Вычисляли уравнения множественной регрессии и парной корреляции. Принятый уровень вероятности  $P=0,95$ .

**Результаты исследований.** С нашей точки зрения, перспективно вычисление зависимостей содержания подвижных форм тяжёлых металлов от свойств почв в определённых лимитах содержания гумуса.

Как видно по данным таблицы 1, при увеличении содержания гумуса отмечается увеличение подвижных форм тяжёлых металлов.

С содержанием гумуса коррелировало содержание  $\text{NO}_3$ ,  $\text{NH}_4$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ , а с этими показателями и

1. Связь содержания гумуса, подвижных форм P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> и NH<sub>4</sub> с содержанием подвижных форм тяжелых металлов в выщелоченном черноземе северного склона (по профилю почв)

Содержание гумуса	NH <sub>4</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Zn	Cu	Mn	Pb	Ni
	мг/100 г		мг/кг				
2,9±0,2	27,6±5,5	14,7±6,3	4,7±0,4	5,0±0,1	137,8±29,0	3,8±0,1	6,2±0,6
1,7±0,2	21,3±2,6	3,1±6,3	3,5±0,1	4,1±0,1	49,0±4,0	3,2±0,1	4,6±0,5

2. Отношение NO<sub>3</sub>/NH<sub>4</sub> в выщелоченных чернозёмах на разных элементах ландшафта

Показатель	Северный водораздел	Южный водораздел	Северный склон	Южный склон	Балка
NO <sub>3</sub> /NH <sub>4</sub> в слое 0–40 см	0,50±0,04	0,82±0,04	0,47±0,07	0,72±0,08	0,55±0,01
NO <sub>3</sub> /NH <sub>4</sub> в верхней части профиля	0,94	1,17	1,0	1,47	0,89
«NO <sub>3</sub> /NH <sub>4</sub> – в нижней части профиля	0,53±0,05	0,70±0,02	0,45±0,03	0,49±0,05	0,62±0,02

содержание подвижных форм тяжёлых металлов в почвах. При этом содержание и соотношение указанных элементов менялось в почвах на разных элементах рельефа (табл. 2).

Как видно по представленным данным, отношение NO<sub>3</sub>/NH<sub>4</sub> выше на южном водоразделе и южном склоне, как более прогреваемых и с меньшим развитием анаэробнобиозиса. Это отношение выше в верхней части профиля и меньше в нижней.

В таблице 3 приведены уравнения регрессии зависимости подвижных форм цинка и марганца от содержания в почвах гумуса (X<sub>1</sub>), частиц < 0,01 мм (X<sub>2</sub>), содержания NO<sub>3</sub> и NH<sub>4</sub> (X<sub>3</sub> и X<sub>4</sub>) и содержания подвижных фосфатов (X<sub>5</sub>).

По полученным данным, свободный член уравнения регрессии зависимости содержания Pb, Zn от изучаемых свойств почв был выше для валовых форм и ниже для подвижных. В то же время индексы корреляции (r) и их достоверности (F) были выше при вычислении рассматриваемых зависимостей для подвижных форм Zn, Pb. Это подтверждается данными следующей таблицы.

Вычисление уравнений регрессии взаимосвязей между свойствами почв позволяет в первом приближении оценить зависимость содержания одного элемента от других. Однако это правомочно только в определённых интервалах X<sub>1</sub>–X<sub>n</sub>. Следует отметить, что при изменении одного из независимых переменных X<sub>i</sub> взаимосвязи Y с другими независимыми переменными также изменяются.

В связи с вышесказанным содержание подвижных форм тяжёлых металлов является функцией не только состава пород, но и свойств почв:

$$Y = f \sum k_i X_i,$$

где k<sub>i</sub> – степень влияния X<sub>i</sub> на Y, X<sub>i</sub> – содержание гумуса, рН, и листовой фракции и т.д.

Рассматриваемые зависимости изменяются для почв отдельных элементов ландшафта. Так, например, для почвы северного водораздела содержание подвижного свинца в зависимости от изучаемых свойств почв описывалось зависимостью:

$$Pb = 6,2 + 0,2X_1 - 0,04X_2 - 0,02X_3 - 0,001X_4 + 0,03X_5; r = 0,96; F = 9,5$$

Для почвы балки:  $Pb = 24,9 - 0,2X_1 - 0,3X_2 + 0,5X_3 - 0,3X_4 + 0,01X_5; r = 0,99; F = 13,8;$

для оценки взаимосвязей между содержанием тяжёлых металлов и свойствами почв целесообразно использовать и вычисление коэффициентов корреляции. Пример такого анализа приведён в таблице 4.

Как видно по представленным данным, содержание валового и подвижного цинка достоверно зависит от содержания гумуса, NO<sub>3</sub>, NH<sub>4</sub>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> и в узком интервале изменения механического состава почв мало зависит от него (все почвы тяжелосуглинистые и глинистые). Интересно, что коэффициенты корреляции содержания валового цинка от свойств почв больше на южном водоразделе, а подвижного – на северном водоразделе.

По полученным данным, содержание тяжёлых металлов в верхнем слое почв не всегда закономерно убывает с увеличением расстояния от источника загрязнения. Так, с увеличением расстояния от автотрассы содержание свинца увеличивалось в депрессиях, в выположенных склонах, на почвах более тяжёлого гранулометрического состава, при более интенсивном развитии дернового процесса почвообразования. В то же время вблизи источника загрязнения его содержание в верхнем слое уменьшалось при более интенсивном развитии подзолообразовательного процесса.

Согласно проведённым исследованиям, взаимосвязи между свойствами почв и содержанием в них подвижных форм тяжёлых металлов дополнительно характеризуют степень загрязнения почв с информационной точки зрения. Они описываются уравнениями парной корреляции, множественной регрессии и характеризуются коэффициентами корреляции. При влиянии отдельных свойств почв на подвижность тяжёлых металлов проявляются эффекты синергизма и антагонизма. Содержание тяжёлых металлов изменяется на почвах отдельных элементов ландшафта, что необходимо учитывать при мониторинге почв. Зависимость содержания в почве тяжёлых металлов от других свойств почв целесообразно учитывать при характеристике степени загрязнения почв и корректировке ПДК.

3. Зависимость содержания валовых и подвижных форм Zn, Mn от свойств чернозёмов северного склона

Элемент	Уравнение регрессии	<i>r</i>	<i>F</i>
Zn валовой	$Zn = 41,7 + 2,4X_1 - 0,6X_2 - 1,3X_3 - 0,35X_4 + 0,46X_5$	0,94	6,2
Zn подвижный	$Zn = 1,4 + 0,4X_1 + 0,03X_2 + 0,02X_3 - 0,04X_4 + 0,03X_5$	0,99	62,7
Mn валовой	$Mn = 469,8 - 14,7X_1 + 3,2X_2 - 12,0X_3 + 4,7X_4 + 2,6X_5$	0,55	0,3
Mn подвижный	$Mn = -73,8 + 13,6X_1 - 0,2X_2 + 0,6X_3 + 4,7X_4 + 2,9X_5$	0,98	21,2

4. Зависимость валового содержания цинка в чернозёмах и его подвижных форм от свойств почв\*

Элемент рельефа	Коэффициенты корреляции $Zn = f(X)$				
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$
валовое содержание					
северный водораздел	0,66	-0,2	0,55	0,53	0,53
южный водораздел	0,83	-0,3	0,80	0,70	0,80
подвижные формы					
северный водораздел	0,88	-0,5	0,85	0,79	0,92
южный водораздел	0,61	-0,4	0,56	0,63	0,60

Примечание: \* – индексация для  $X_1 - X_5$ , как в таблице 3

Токсичное влияние тяжёлого металла на компоненты экологической системы, и в т.ч. на биоту, зависит от свойств почв  $Z_i$  (рН, содержание гумуса, ила и т.д.):

$$X_i = f \cdot Y k_i Z_i^n,$$

где  $X_i$  – содержание подвижной формы тяжёлого металла;

$k$  – степень влияния  $Z_i$  на  $X_i$ .

Каждый тяжёлый металл влияет на конкретные процессы в определённой степени:

$$Y_i = f(k_i X_i)^n,$$

где  $X_i$  – содержание тяжелого металла;

$k$  – степень влияния  $X_i$  на  $Y_i$ .

При действии на почву и биоту нескольких тяжёлых металлов:

$$Y_i = f \cdot Y k_i X_i^n,$$

где  $Y_i$  – отдельное свойство почв или процесс в почве и в растениях;

$k_i$  – степень влияния  $X_i$  на  $Y_i$ . Сумма  $k_i = 1$ ,  $n$  – показатель экспоненциального характера зависимости. При этом, очевидно, что в разных интервалах  $X_i$  зависимости будут отличаться.

По полученным данным, свободный член в уравнениях регрессии зависимости содержания тяжёлых металлов от свойств почв выше для валовых форм тяжёлых металлов, а коэффициенты корреляции и уровни достоверности выше для зависимостей, вычисляемых для подвижных форм тяжёлых металлов.

**Литература**

1. Гукалов В.Н. Тяжёлые металлы в системе агроландшафта. Краснодар: Изд-во И.П. Купреев, 2010. 345 с.
2. Алексеев Ю.В. Тяжёлые металлы в почвах и растениях. Л., 1987. 137 с.
3. Башкин В.Н. и др. Биогеохимические основы экологического нормирования. М.: Наука, 1993. 304 с.
4. Ильин В.Б. Тяжёлые металлы в системе почва – растение. Новосибирск: Наука, 1991. 215 с.
5. Савич В.И., Седых В.А., Никиточкин Д.Н. и др. Агроэкологическая оценка состояния свинца в системе почва – растение. М.: ВНИИА, 2012. 360 с.
6. Савич В.И. Физико-химические основы плодородия почв. М.: РГАУ-МСХА, 2013. 430 с.
7. Савич В.И., Федорин Ю.В., Химица Е.Г. и др. Почвы мегаполисов, их экологическая оценка, использование и создание (на примере г. Москвы), М.: Агробизнесцентр, 2007. 660 с.
8. Савич В.И., Белопухов С.Л., Филиппова А.В. Новые методы очистки почв от тяжёлых металлов // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2013. № 4 (42). С. 322–328.
9. Гукалов В.Н., Савич В.И., Никиточкин Д.Н. и др. Скорость вытеснения тяжёлых металлов из чернозёмов и депонирующая способность чернозёмов, как факторы корректировки степени загрязнения почв // Плодородие. 2014. № 2. С. 44–46.
10. Глазовская М.А. Методические основы оценки эколого-геохимической устойчивости почв к техногенным воздействиям. М.: МГУ, 1997. 102 с.
11. Мотузова Г.В. Системно-экологический анализ соединений микроэлементов в почвах: автореф. дисс. ... докт. биол. наук, М.: МГУ, 1992. 33 с.
12. Савич В.И., Сычев В.Г., Шишов Л.Л. и др. Экспрессные методы оценки обеспеченности почв элементами питания и уровня загрязнения токсикантами. М.: ВНИИА, 2004. 152 с.