

АГРОХИМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АГРОСЕРОЙ ПОЧВЫ

Р.Н. УШАКОВ, Н.А. ГОЛОВИНА

(Рязанский государственный агротехнологический университет имени П.А. Костычева)

В агросерой тяжелосуглинистой почве определены потенциальная буферная способность по отношению к калию – PBC^k , фосфору – PBC^p , емкость буферности к подкислению – $ЕБк$ (буферные свойства). Буферные свойства почвы отражают межфазовые взаимодействия и являются количественной мерой устойчивости питания сельскохозяйственных растений фосфором. В многочисленных публикациях показано влияние различных удобрений на фосфатную буферность почв, проявляющееся через изменение почвенных свойств. Научная новизна работы состоит в том, что более широкая вариация почвенных свойств и их разные комбинации в пределах одного подтипа агросерой почвы позволяют более детально представить корреляции буферных свойств и их компонентов от основных агрохимических свойств. Цель исследований – установить зависимости буферных свойств агросерой почвы от основных агрохимических свойств – кислотности, гумуса, обеспеченности фосфором и калием для разработки агрохимической модели устойчивости агросерой почвы. Вариация почвенных свойств позволила установить корреляционно-регрессионные связи, рассчитать вероятностные уравнения. Потенциальную калийную и фосфатную буферность определяли по Беккетту, буферность к подкислению – потенциометрическим методом. Установлено, что низкий уровень устойчивости серой лесной почвы достигается при относительной активности калия (AR_o) меньше $2 \text{ М/л} \cdot 10^{-3}$, PBC^k меньше 24 ед., средний – при AR_o $4 \text{ М/л} \cdot 10^{-3}$, PBC^k – не ниже 45 ед. и высокий – при AR_o более $4 \text{ М/л} \cdot 10^{-3}$ и PBC^k более 45 ед. При равновесной концентрации фосфора ($C_{\text{равн}}$ в вытяжке $0,01 \text{ М CaCl}_2$), емкости десорбции (Q_o) и потенциальной буферной способности менее $0,1 \text{ мг/л}$, $0,7 \text{ мг P/100 г}$ и 34 мл/г соответственно степень устойчивости агросерой почвы расценивается как низкая. Средний уровень устойчивости обеспечивается при $P_{\text{равн}}$ от $0,1$ до $0,2 \text{ мг/л}$, Q_o – от $0,7$ до $1,4 \text{ мг P/100 г}$ и PBC^p – от 34 до 45 мл/г ; высокий уровень устойчивости при $P_{\text{равн}}$ более $0,2 \text{ мг/л}$, Q_o более $1,4 \text{ мг P/100 г}$ и PBC^p более 45 мл/г .

Ключевые слова: агросерая почва, фактор емкости, активность калия, калийная буферность, фосфатная буферность, емкость буферности к подкислению, физико-химические свойства, модель плодородия.

Введение

Масштабность современных экологических вызовов принуждает ориентировать современное сельское хозяйство на экологически безопасное производство. Одним из вариантов, позволяющих приблизить решение данной проблемы, является повышение устойчивости почвы к неблагоприятным условиям. В частности, некоторое опасение вызывает возможное истощение почв элементами питания [12, 13].

Одной из форм проявления устойчивости почвы можно считать способность ее к восстановлению концентрации подвижных форм элементов питания при их отчуждении с урожаем. Поэтому эта особенность почвы является дополнительным показателем, характеризующим состояние в ней калия и фосфора [9, 10].

Проблема устойчивости почв широко обсуждается в научной литературе [1, 2, 8, 14, 15]. Для определения меры устойчивости почв необходима разработка соответствующих моделей плодородия. Современные модели в большей степени указывают на уровни плодородия в соответствии с продуктивностью сельскохозяйственных растений [3]. В качестве дополнений к существующим моделям предлагается физико-химический блок, отражающий устойчивость почв, и включающий потенциальную калийную и фосфатную буферность, а также их компоненты, буферность к подкислению (буферные свойства). Цель исследований состояла в установлении зависимости буферных свойств агросерой почвы от основных агрохимических свойств – кислотности, гумуса, обеспеченности фосфором и калием. Полученные данные позволили нам впервые для серых лесных почв разработать агрохимическую модель устойчивости к неблагоприятным воздействиям.

Методика исследований

Объектом исследования послужила агросерая тяжелосуглинистая иловато-пылевая почва. Мощность гумусового горизонта составляла 22–24 см, гумусово-элювиального – 20–22 см.

Для изучения почвенных условий на формирование устойчивости калийного и фосфатного режимов было проанализировано 25 почвенных образцов, отличающихся агрохимическими показателями (табл. 1,2). Для каждого образца определены значения компонентов буферности. Вариация признаков позволила установить связи, которые можно признать закономерными в объеме предложенного массива данных.

Гумус определяли по Тюрину. Для получения Q/I – изотерм серию навесок каждого образца почвы перемешивали в течение 30 мин с 10 мл раствора 0,01 М CaCl₂, содержащего различное количество калия (раствор KCl от 0,2 до 1,0 мг-экв/л). В равновесных растворах определяли величины ±ΔК и AR. ±ΔК представляет собой количество подвижного калия, которое почва отдает (–ΔК) или поглощает (+ΔК) к моменту установления равновесия между калием почвы и калием раствора, AR равна отношению активностей ионов калия и кальция. Изотерму сорбции, представляющую собой линию, прямую в верхней части и изогнутую в нижней, строили в координатах ΔК и AR₀. Изотермы строили по методике [16]. Легкоподвижный калий определяли извлечением калия вытяжкой 0,002 М CaCl₂.

Таблица 1

Исходные данные для установления зависимостей компонентов буферности от содержания калия, гумуса, кислотности

№	AR ₀ M ^{0.5} М/л	ΔK ₀ ⁺ мг-экв/100 г	РВСК ^к	Гумус, %	pH _{KCl}	Калий, мг/100 г	
						обменный	легкоподвижный
1	0,0050	0,240	43	2,25	4,9	13,7	1,0
2	0,0015	0,053	35	1,65	4,3	21,4	1,6
3	0,0020	0,065	42	1,88	4,3	21,9	1,8
4	0,0010	0,037	50	1,88	4,9	14,5	1,0
5	0,0010	0,035	35	1,88	4,4	19,3	1,6
6	0,0020	0,050	28	2,15	5,6	25,4	1,6
7	0,0020	0,060	32	2,85	5,2	26,7	1,8
8	0,0010	0,024	33	1,88	5,0	19,7	1,3
9	0,0012	0,048	39	1,88	4,9	21,4	1,6
10	0,0001	0	21	2,85	5,8	15,3	0,6

№	AR ₀ M ^{0,5} М/л	ΔK ₀ ⁺ МГ-ЭКВ/100 Г	РВС ^к	Гумус, %	рН _{КСl}	Калий, мг/100 г	
						обменный	легкопод- вижный
11	0,0006	0	18	2,85	5,8	12,1	0,6
12	0,0002	0	29	2,60	4,8	7,5	0,3
13	0,0009	0	21	3,00	4,7	8,1	0,3
14	0,0002	0	19	2,85	4,6	10,1	0,8
15	0,0001	0,002	23	2,50	6,3	12,1	0,8
16	0,00001	0	26	2,25	4,8	8,4	0,8
17	0,0001	0	23	2,35	4,6	9,5	0,8
18	0,0002	0	28	2,50	5,2	10,1	0,6
19	0,0001	0	36	2,60	6,3	10,1	0,8
20	0,00045	0,012	27	2,60	5,2	13,3	1,0
21	0,00015	0	32	2,15	4,9	7,5	0,6
22	0,00110	0	15	2,35	4,8	12,1	1,0
23	0,0008	0,019	22	2,35	4,9	15,3	1,4
24	0,0200	0,2000	10	5,00	6,2	46,6	6,9
25	0,0025	0	14	2,15	5,6	16,9	1,4

Термодинамическая оценка фосфатного состояния почв проведена с использованием метода изотерм сорбции фосфатов: равновесная концентрация фосфора (P_{равн}) – по Beckwith, потенциальную буферную способность почв по отношению к фосфору (РВС^р) – по Beckett (1964), максимальную буферную способность к фосфору (МВС^р), буферную способность к фосфору при заданной равновесной концентрации фосфора 2 мг/л в растворе (ВС^р) – по Keramidas и др. (1983) на изотермах Q/Y и Ленгмюра.

Таблица 2

Агрохимическая характеристика агросерой почвы и ее различные виды фосфатной буферности

№ образца	P в CaCl ₂ МГ/Л P _{равн}	P ₂ O ₅ , МГ/100 Г В ВЫТЯЖКЕ		Гумус, %	рН _{КСl}	МВС	ВС (X1=2)	Q ₀ ⁺ МГ/100 Г	Y ₀ ⁺ МГ/Л	РВС ^р , МЛ/Г
		НСl	K ₂ SO ₄							
1	0,044	25,5	0,5	2,25	4,9	1,8	1,1	0,16	0,12	13,5
2	0,044	30,7	0,3	1,65	4,3	2,4	1,3	0,21	0,11	18,7
3	0,044	30,3	0,5	1,88	4,3	3,0	1,3	0,24	0,11	21,9
4	0,044	26,5	0,3	1,88	4,9	2,1	1,1	0,17	0,12	14,7
5	0,132	28,7	0,6	1,88	5,0	1,3	1,1	0,47	0,36	12,9
6	0,044	20,3	0,4	1,75	5,2	5,0	1,1	0,325	0,10	32,0
7	0,132	35,3	0,3	2,00	5,2	0,9	1,1	0,34	0,43	7,90
8	0,088	34,0	0,3	1,65	4,4	1,9	1,35	0,45	0,22	20,7
9	0,088	34,3	0,5	2,00	4,4	2,2	1,4	0,42	0,22	18,7
10	0,176	19,8	0,7	2,85	5,8	2,7	1,6	1,30	0,41	32,0
11	0,176	14,9	0,6	2,85	5,8	4,1	1,7	2,315	0,38	60,8
12	0,132	13,1	0,6	2,60	4,8	3,1	1,6	1,04	0,30	34,5
13	0,176	14,4	0,3	3,00	4,7	3,6	1,6	1,74	0,39	44,3
14	0,044	27,0	0,6	2,85	4,6	2,6	1,3	0,21	0,11	18,7
15	0,132	24,0	0,5	2,60	5,2	3,6	1,3	1,12	0,30	37,3
16	0,176	17,9	0,5	2,50	6,3	3,7	1,5	1,89	0,39	48,8
17	0,088	15,2	0,5	2,35	4,6	2,5	1,4	0,47	0,21	21,9
18	0,088	14,9	0,6	2,50	5,2	3,8	1,7	0,80	0,20	40,5
19	0,132	17,9	0,5	2,60	5,2	2,8	1,6	0,87	0,31	27,9

№ образца	Р в CaCl ₂ , мг/л Р _{равн}	P ₂ O ₅ , мг/100 г в вытяжке		Гумус, %	рН _{KCl}	МВС	ВС (X1=2)	Q _{0'} мг/100 г	Y _{0'} мг/л	РВС _p , мл/г
		HCl	K ₂ SO ₄							
20	0,132	17,7	0,5	2,75	5,1	2,8	1,45	0,71	0,32	21,9
21	0,132	17,0	0,5	2,15	4,9	3,5	1,4	0,92	0,31	29,8
22	0,088	19,4	0,5	2,35	4,8	4,2	1,3	0,61	0,20	29,8
23	0,088	18,4	0,5	2,35	5,4	3,3	1,0	0,61	0,20	29,8
24	0,132	19,1	0,4	2,15	5,6	1,3	1,2	0,39	0,40	9,80
25	0,044	14,1	0,4	1,75	5,2	2,2	0,9	0,137	0,13	10,57

Фосфор определяли подвижный по Кирсанову и по методу Карпинского и Замятиной в вытяжке 0,015 М K₂SO₄. При определении фосфатной буферности использовали 0,01 М CaCl₂ при соотношении почвы к раствору как 1:10 и 1:5.

Для изучения устойчивости почвы к подкислению определяли буферность к кислоте в 18 образцах, отличающихся в комбинациях по обменной (рН_{KCl}) и актуальной (рН_{H₂O}) кислотности (табл. 3).

Таблица 3

Буферность к кислоте по интервалам значений рН 0.5 единицы (в скобках процент буферности в данном интервале рН от общей буферности)

рН _{KCl}	рН _{H₂O}	Ca ²⁺ +Mg ²⁺ , мг-экв/100 г	7,5- 7,0	7,0- 6,5	6,5- 6,0	6,0- 5,5	5,5- 5,0	5,0- 4,5	4,5- 4,0	4,0-3,5	3,5- 3,0
5,8	6,97	17,8	нет	2,5	2,5	5,0	15,0	12,5	20,0	17,4	24,9
5,8	6,91	23,5	нет	2,5	2,5	7,5	10,0	12,5	20,0	19,9	24,9
4,7	5,92	12,9	нет	нет	нет	2,5	5,0	7,5	10,0	14,9	19,8
4,7	5,77	13,6	нет	нет	нет	2,5	2,5	7,5	12,5	14,9	19,8
4,6	5,81	15,7	нет	нет	нет	2,5	5,0	7,5	15,0	17,5	27,3
5,15	6,30	18,2	нет	нет	нет	2,5	2,5	7,5	22,5	17,4	24,9
6,3	7,54	31,1	2,5	7,5	10,0	12,5	15,0	20,0	25,0	25,0	34,9
4,8	6,08	22,3	нет	нет	нет	2,5	5,0	5,0	7,5	12,4	20,0
4,6	5,92	21,0	нет	нет	нет	2,5	5,0	7,5	12,5	17,4	27,3
5,2	6,37	20,5	нет	нет	2,5	5,0	7,5	10,0	15,0	19,9	29,9
6,25	7,41	33,3	2,5	2,5	5,0	10,0	10,0	12,5	25,0	22,5	29,9
6,0	7,19	25,6	нет	2,5	2,5	5,0	15,0	12,5	15,0	17,5	29,8
5,2	6,42	20,6	нет	нет	2,5	2,5	7,5	7,5	12,5	17,4	22,4
5,1	6,23	21,5	нет	нет	2,5	2,5	5,0	10,0	12,5	17,4	27,3
4,9	6,22	19,5	нет	нет	2,5	2,5	5,0	10,0	15,0	17,5	27,3
4,8	6,02	19,3	нет	нет	нет	2,5	5,0	7,5	7,5	15,0	22,3
5,4	6,64	21,3	нет	2,5	2,5	5,0	7,5	12,5	12,5	17,4	24,9
4,9	5,87	16,1	нет	нет	нет	2,5	5,0	10,0	12,5	14,9	22,4

Для определения емкости буферности к подкислению (ЕБк) использовали метод непрерывного потенциометрического титрования (НПТ) [11]. Статистическая обработка результатов исследований произведена с использованием пакета прикладных программ STATISTICA 6.0.

Результаты и их обсуждение

Потенциальная буферная способность по отношению к калию и фосфору может служить показателем устойчивости калийного, фосфатного питания. В большинстве научных работ показано влияние агротехнологических мероприятий на формирование калийного и фосфатного режимов [4, 5, 6, 7, 9, 10].

Мы установили, что от гумуса зависит относительная активность калия (AR_o). Уравнение регрессии имеет вид: $Y = -0,0098 + 0,0046X$. Предлагается для средней и высокой степени устойчивости функционирования агросерых суглинистых почв доведение значения AR_o соответственно до 2–4 и $4-7 \cdot 10^{-3}$ М/л^{0,5}. В нашем случае такие величины активности возможны при ориентировочном содержании гумуса в 2,5–2,9% и 2,9–3,5%. Исходя из зависимости AR_o от обменного калия, имеющий вид $Y = -0,0045 + 0,0004X$, содержание последнего должно быть для средней степени устойчивости не ниже 17–22 мг/100 г, для высокой – 22–30 мг/100 г. При содержании гумуса меньше 2,5% вероятное значение AR_o составит $1,7 \cdot 10^{-3}$ М/л^{0,5}, что соответствует низкой степени устойчивости; если гумуса больше 2,5 %, то AR_o превышает $10 \cdot 10^{-3}$ М/л^{0,5}; значения $-ΔK_o$ (десорбционная ветвь) и $+ΔK_o$ (адсорбционная ветвь) при гумусе < 2,5% ожидаются соответственно около 0,061 и 22,7 мг-экв/100 г, при гумусе > 2,5% – 0,090 и 15,6 мг-экв/100 г. (табл. 4).

Таблица 4

Вероятностные уравнения для прогноза калийного состояния агросерой почвы

Условие	AR_o , М/л ^{0,5}	$-ΔK_o$, мг-экв/100 г	$+ΔK_o$, мг-экв/100 г
если гумуса <2 гумуса >2	$Y = -1,15 + 1295X$	$Y = -2,70 + 60,8X$	$Y = -5,8 + 0,30X$
	$Y = -0,25 + 92,9X$	$Y = -0,23 + 13,6X$	$Y = 4,3 + 0,34X$
$K_2O < 10$	$Y = -0,63 + 2185X$	не установлено	$Y = -8,22 + 0,62X$
$20 > K_2O > 10$	$Y = -0,89 + 1319X$	$Y = -0,70 + 54,2X$	$Y = -3,07 + 0,23X$
$K_2O > 20$	$Y = -0,40 + 85X$	$Y = -0,90 + 11,4X$	$Y = -3,47 + 0,21X$
$K_2O < 10$; гумуса < 2.5	$Y = -1,04 + 11020X$	не установлено	$Y = -9,39 + 0,75X$
$20 > K_2O > 10$; гумуса < 2.5	$Y = -1,03 + 1189X$	$Y = -1,08 + 55X$	$Y = -2,60 + 0,19X$
$K_2O > 20$; гумуса < 2.5	$Y = -5,59 + 3679X$	$Y = -56,5 + 104,7X$	$Y = -3,40 + 0,20X$
$K_2O < 10$; гумуса > 2.5	$Y = -1,03 + 1769X$	не установлено	$Y = -41,3 + 2,83X$
$20 > K_2O > 10$; гумуса > 2.5	$Y = -1,10 + 3560X$	$Y = -0,24 + 115,6X$	$Y = -6,74 + 0,54X$
$K_2O > 20$; гумуса > 2.5	$Y = -0,69 + 62,9X$	$Y = -1,05 + 8,09X$	не установлено
гумуса < 2.5; $pH_{KCl} < 4.5$	$Y = -3,40 + 2510X$	$Y = -2,82 + 55,4X$	$Y = -20,1 + 1,05X$
гумуса < 2.5; $pH_{KCl} > 4.5$	$Y = -0,93 + 1192X$	$Y = -0,77 + 43,2X$	$Y = -2,9 + 0,22X$

Примечание: содержание гумуса в %, обменного калия в мг/100 г почвы.

При содержании обменного калия < 10 мг/100 г и от 10 до 20 мг/100 г почвы степень устойчивости низкая, так как по нашим расчетам AR_o не будет превышать $2,0 \cdot 10^{-3}$ М/л^{0,5}. Если обменного калия > 20 мг/100 г, то можно достичь высокой степени устойчивости почвы по AR_o , значение которой превышает $7 \cdot 10^{-3}$ М/л^{0,5}. При различных комбинациях обменного калия и гумуса получена следующая закономерность: максимальное повышение AR_o до $16,5 \cdot 10^{-3}$ М/л^{0,5} при увеличении гумуса ($> 2,5\%$) отмечалось только на фоне обеспеченности агросерой почвы обменным калием не ниже средней.

Вероятностные значения AR_o в математической обработке, включающей комбинации обменного калия с гумусом менее 2,5%, ниже по сравнению без гумуса. Сравнение этих значений позволяет оценить участие гумуса в формировании AR_o . Для диапазона $10 > K_2O > 0$ вклад гумуса составляет 26%, $K_2O > 20$ мг/100 г – 12%.

Уравнением Дубинина–Радушкевича была аппроксимирована та ветвь экспериментальной изотермы, которая проходит выше оси ординат ($+\Delta K$) и указывает на адсорбцию калия. Знак коэффициента регрессии в уравнении $Y = 28,5 - 2,8X$ позволяет заключить, что чем кислее почва, тем больше поглощается калия, что связано, вероятно, с недонасыщенностью илистых фракций гумусом, содержание которого составляло в большинстве случаев 1,65 – 2,25%, а $pH_{KCl} - 4,3 - 5,0$. Установлено, что, если гумуса $< 2,5\%$ и $pH_{KCl} < 4,5$, то значение $-\Delta K$ возрастает в 1,8 раза (до 0,07 мг-экв/100 г) по сравнению с $pH_{KCl} > 4,5$. В кислой среде ожидается также увеличение поглощения калия на 2–3 мг-экв/100 г ($+\Delta K = 20$ мг-экв/100 г).

Значение потенциальной буферной способности по отношению к калию (PBC^k) возрастает при увеличении гумуса в почве. В 44% случаев при содержании гумуса меньше 2,5% PBC^k превышала 20 ед., при этом содержание обменного калия в области $pH_{KCl} < 5,0$ колебалось от 8 до 15 мг/100 г, при $pH_{KCl} > 5,0$ – от 19 и выше. В 32% случаев содержание гумуса более чем 2,5%, привело к формированию $PBC^k > 20$ ед., однако, это возможно только при ниже средней обеспеченности почвы обменным калием.

Наибольшее значение PBC^k (рис. 1) было установлено в 16% случаев, когда отмечалось снижение гумуса до 1,7–1,9% и превышение обменным калием величины 20 мг/100 г, хотя последний определяет относительную активность калия, поэтому значение PBC^k должно снижаться. Проанализировав причины, считаем, что такая PBC^k не может считаться оптимальной, так как ее формирование происходит на фоне кислой реакции среды. По-видимому, по причине высокой кислотности почвы и низкой обеспеченности ее калием (K_2O около 10 мг/100 г) следует ожидать формирования низкой буферности ($PBC^k = 32$) при содержании гумуса $> 2,5\%$. Аналогичный эффект обнаруживается и при среднекислой реакции среды, но при более высоких значениях обменного калия. В первом и втором случаях (в сумме на их долю приходилось 36%) низкая PBC^k была обусловлена невысокой десорбционной способностью при содержании гумуса $> 2,5\%$. В 40% случаев PBC^k возросла до 41 ед. на фоне обеспеченности калием, не превышающей 20 мг/100 г, что обусловлено не только незначительной активностью калия, но и низким содержанием гумуса ($< 2,5\%$).

Исходя из полученных экспериментальных данных, и учитывая приемлемую для средней степени устойчивости агросерой почвы относительную активность калия 0,002–0,003 М/л, рассчитано необходимое содержание гумуса и обменного калия – 2,6–2,8% и 17,1–19,7 мг/100 г соответственно. При таких величинах вероятное значение ΔK составляет 0,044–0,060 мг-экв/100 г. В соответствии с приведенными расчетами, основанными на регрессионных уравнениях, $PBC^k = 22$. Это не самый оптимальный показатель буферности, так как можно в агросерой тяжелосуглинистой почве за счет комплексного ее окультуривания повысить ΔK до 0,09 мг-экв/100 г. При такой адсорбционной способности содержание гумуса долж-

но быть 3,9%, обменного калия – 26 мг/100 г. Если принять за среднюю степень устойчивости $AR_o = 0,002-0,003$ М/л, то PBC^k составит 30–45.

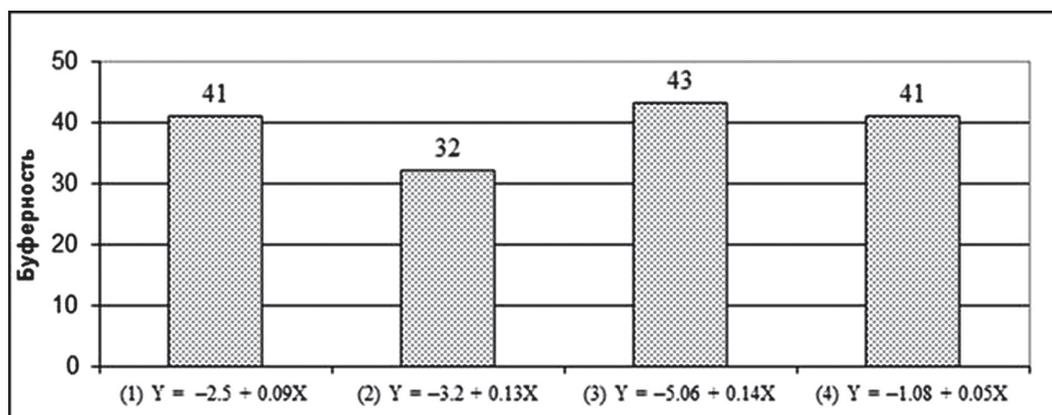


Рис. 1. Потенциальная буферная способность по отношению к калию с вероятностными уравнениями при различных комбинациях содержания гумуса и обменного калия

Примечание: условия для уравнения 1 – гумуса < 2,5; $K_2O < 20$; 2 – гумуса > 2,5; $K_2O < 20$; 3 – гумуса < 2,5; $K_2O > 20$; 4 – гумуса > 2,5; $K_2O > 20$

Следовательно, устойчивость калийного режима складывается при содержании гумуса в агросерой почве выше 2,5%, обменного калия – не ниже 17–20 мг/100 г и $pH_{KCl} > 5$. Увеличение содержания гумуса приводит к повышению относительной активности калия и улучшению функционального состояния ППК. При содержании обменного и легкоподвижного калия в почве соответственно ниже 12 и 1 мг/100 г AR_o элемента крайне низкая ($0,5-0,7 \cdot 10^{-3}$ М/л). При возрастании количества обменного калия в 2 раза значение AR_o увеличивается в 7 раз, ΔK_o – в 10 раз, PBC^k – в 2,2 раза (табл. 5).

Таблица 5

Влияние содержания обменного калия $K_2O_{обм}$, мг/100 г, легкоподвижного калия $K_2O_{легк}$, мг/100 г и гумуса, % на компоненты PBC^k агросерой почвы

Условие	$AR_o \cdot 10^{-3}$ М/л	$-\Delta K_o$, мг-экв/100 г	PBC^k
$K_2O_{обм} < 12$	<0,5	<0,01	20
$20 > K_2O_{обм} > 12$	3,5	0,1	29
$20 > K_2O_{обм} > 12$ $3.5 > \text{гумус} > 2.5$	4,5	0,20	44
$K_2O_{легк} < 1$	<0,7	<0,01	14
$2 > K_2O_{легк} > 1$	1,3	0,04	31

Максимальная буферная способность по отношению к фосфору – MBC^p , буферная способность к фосфору – BC^p (при равновесной концентрации фосфора 2 мг/л), Потенциальная буферная способность к фосфору – PBC^p зависят от содержания подвижного фосфора в растворе и гумуса. При этом установлено, что если при

увеличении подвижного фосфора, определенного по методу Кирсанова, значения всех видов буферности снижались, то по фосфору в вытяжках CaCl_2 и K_2SO_4 они увеличивались.

Наибольшие величины различных видов фосфатной буферности ($\text{MBC} = 4,1$; $\text{BC} = 17$; $\text{PBC}^p = 50$) достигаются при содержании гумуса и $\text{P}_{\text{равн}} > 2,5\%$ и $0,11$ мг/л соответственно. Возрастание PBC^p при отмеченных условиях обусловлено увеличением десорбционной способности (Q_0) до $1,9$ мг/100 г (вероятностное уравнение $Y = -2,0 + 1,6X$). При гумусе $< 2,5\%$, $\text{P}_{\text{равн}} < 0,11$ – $Q_0 = 0,6$ мг/100 г ($Y = -1,7 + 4,3X$); при гумусе $< 2,5\%$, $\text{P}_{\text{равн}} > 0,11$ – $Q_0 = 1,5$ мг/100 г ($Y = -0,9 + 1,3X$).

Аналогичная закономерность установлена для гумуса $> 2,5\%$ и $\text{pH}_{\text{KCl}} > 4,5$. Следовательно, повышение в почве органического вещества, фосфора, снижение кислотности способствуют улучшению буферных свойств.

Считается, что наиболее благоприятным фосфатным режимом обладает почва с относительно высокими буферными свойствами, обусловленными не поглощением фосфора твердой фазой, а его десорбцией. В наших исследованиях, проведенных на агросерыхтяжелосуглинистых почвах, в 36% случаев имело место одновременное повышение интенсивности фосфора в растворе и PBC^p относительно 25 мг/г. Оптимальные условия достигаются при содержании гумуса около 3,0%; $\text{pH}_{\text{KCl}} - 5,3$ и $\text{P}_{\text{равн}} - 0,15$ мг/л. В 32% случаев происходило снижение как PBC^p , так и Y_0 при условии содержания гумуса $< 2,5\%$, $\text{P}_{\text{равн}} < 0,11$ мг/л и возрастания кислотности почвенного раствора до 4,6 pH_{KCl} . Установлено, что, если содержание $\text{P}_{\text{равн}} \leq 0,11$ мг/л, а гумуса $\leq 2,5\%$, то $Q_0 = 0,68$ мг/100 г. Если величины отмеченных выше параметров увеличиваются соответственно до 0,15 мг/л и 3,5%, то Q_0 возрастает до 1,35 мг/100 г, а $\text{PBC}^p - с 34 до 45$ мг/г. Примем значения $\text{PBC}^p = 34 - 45$ мг/г, $Q_0 - 0,6 - 1,3$ мг/100 г и $\text{P}_{\text{равн}} = 0,1 - 0,2$ за средний уровень устойчивости агросерой почвы.

Установлена зависимость емкости буферности к подкислению (ЕБк) от содержания поглощенных оснований кальция, магния и различных видов кислотности. Например, исходя из уравнений регрессий рассчитано, что увеличение в агросерой почве содержания суммы кальция и магния на 1 мг-экв/100 г почвы и снижение кислотности почвы (pH_{KCl}) на единицу способствуют повышению значения ЕБк соответственно на 3,6 и 39,3 мМ-экв/кг почвы.

Полученные результаты позволили разработать ориентировочную модель ранжированной устойчивости агросерой почвы (табл. 6).

Таблица 6

Модель агрохимической устойчивости агросерой тяжелосуглинистой почвы

Показатели	Единица измерения	Уровень устойчивости почвы		
		низкий	средний	высокий
Общая за интервалы pH емкость буферности к подкислению (ЕБк)	мМ-экв/100 г	< 9	9 – 11	> 11
Поглощенные основания ($\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$)	мг-экв/100 г	< 20	20 – 25	> 25
Относительная активность калия (AR_0)	М/л · 10 ⁻³	< 2	2 – 4	> 4
Потенциальная калийная буферность (PBC^k)	фактор емкости в мг-экв/100 г	< 24	24 – 45	> 45
Равновесная концентрация фосфора (в вытяжке 0.01 М CaCl_2)	мг/л	< 0.1	0.1 – 0.2	> 0.2
Емкость десорбции (Q_0)	мг P/100 г	< 0.7	0.7 – 1.4	> 1.4
Потенциальная фосфатная буферность (PBC^p)	мл/г	< 34	34 – 45	> 45

Заключение

При содержании обменного калия менее 10 мг/100 г и от 10 до 20 мг/100 г почвы степень устойчивости низкая, так как AR_o не будет превышать $2,0 \cdot 10^{-3}$ М/л^{0,5}. Если обменного калия больше 20 мг/100 г, то достигается высокая степень устойчивости почвы по AR_o , значение которой превышает $7 \cdot 10^{-3}$ М/л^{0,5}.

При различных комбинациях обменного калия и гумуса получена следующая закономерность: максимальное повышение относительной активности калия до $16,5 \cdot 10^{-3}$ М/л^{0,5} и при увеличении гумуса отмечается только на фоне обеспеченности агросерой почвы обменным калием не ниже средней. В 44% случаев при содержании гумуса < 2,5%, РВС^к превышает 20 ед., при этом содержание обменного калия в области рН < 5,0 колебалось от 8 до 15 мг/100 г, при рН_{к_кл} > 5,0 – от 19 и выше. В 32% случаев при содержании гумуса более, чем 2,5%, РВС^к было больше 20 ед., однако, это возможно только при ниже средней обеспеченности почвы калием. Для достижения оптимальной активности калия 0,002 – 0,0035 М/л, содержание гумуса должно быть не ниже 3,0%, обменного калия – 20 мг/100 г. При превышении гумуса 3% (до 3,5%) и обменного калия 20 мг/100 г РВС^к увеличивается в два раза (с 20–24 до 40–45).

Наибольшая величина РВС^р достигается при содержании гумуса и $P_{равн}$ в почве > 2,5% и 0.11 мг/л соответственно. При гумусе < 2,5, $P_{равн} < 0,11 - Q_o = 0,6$ мг/100 г; при гумусе < 2,5, $P_{равн} > 0,11 - Q_o = 1,5$ мг/100 г. Аналогичная закономерность установлена для гумуса > 2,5% и рН_{к_кл} > 4,5. Поэтому повышение в почве органического вещества, фосфора, снижение кислотности способствуют улучшению буферных свойств агросерой почвы.

Если общая за интервалы рН_{к_кл} ЕБк лежит в диапазоне 9–11 мМ–экв/100 г, то достигается средний уровень устойчивости почвы. При этом поглощенных оснований должно быть не менее 20 мг–экв/100 г. Не рекомендуется доводить ЕБк до значений менее 9 мМ–экв/100 г.

Библиографический список

1. *Ананьева Н.Д.* Микробиологические аспекты самоочищения и устойчивости почв. М.: Наука, 2003. 223 с.
2. *Державин Л.М., Фрид А.С.* О комплексной оценке плодородия пахотных земель // *Агрохимия*. 2002. № 8. С. 5–13.
3. *Ильина Л.В.* Комплексное воспроизводство плодородия серых лесных почв и его эффективность. Рязань: Узоречье, 1997. 231 с.
4. *Кирпичников Н.А., Шильников И.А., Аканова Н.И., Чернышкова Л.Б.* Фосфатный режим дерново-подзолистой почвы в зависимости от применения известковых и фосфорных удобрений // *Плодородие*. 2014. №4 (79). С. 21–23.
5. *Лукин С.М.* Калийное состояние дерново-подзолистой супесчаной почвы и баланс калия при длительном применении удобрений // *Агрохимия*. 2012. №12. С. 5–14.
6. *Минеев В.Г., Гомонова Н.Ф., Морачевская Е.В.* Изменение свойств и калийного состояния дерново-подзолистой среднесуглинистой почвы при 40-летнем применении агрохимических свойств // *Агрохимия*. 2013. №10. С. 3–12.
7. *Никитина Л.В.* Влияние длительного применения удобрений в зернопропашном севообороте на калийный режим дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почвы // *Агрохимия*. 2012. №12. С. 15–23.
8. *Никитищен В.И.* Плодородие почвы и устойчивость функционирования агроэкосистемы. М.: Наука, 2002. 258 с.

9. Савич В.И., Платонов И.Г., Духанин Ю.А., Поветкина Н.Л., Сафонов А.Ф. Комплексная оценка состояния калия в почве // Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии. 2006. №3. С. 15–28.

10. Савич В.И., Байбеков Р.Ф., Амергузжин Х.А., Платонов И.Г., Садуакасов Н.М. Комплексная оценка обеспеченности почв фосфатами // Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии. 2004. №1. С. 3–15.

11. Соколова Т.А. Взаимодействие лесных суглинистых подзолистых с модельными кислыми осадками и кислотнo-основная буферность подзолистых почв. М.: Изд-во МГУ, 2001. 208 с.

12. Сычев В.Г., Лунев М.И., Павлихина А.В. Современное состояние и динамика плодородия пахотных почв России // Плодородие. 2012. №4 (66). С. 5–7.

13. Чекмарев П.А., Лукин С.В. Мониторинг плодородия пахотных почв Центрально-Черноземных областей России // Агрохимия. 2013. №4. С. 11–22.

14. Черников В.А., Милащенко Н.З., Соколов О.А. Экологическая безопасность и устойчивое развитие // Устойчивость почв к антропогенному воздействию. Пушино: ОНТИ ПНЦ РАН, 2001. Кн. 3. 203 с.

15. Чижикова Н.П. Изменение минералогического состава тонких фракций почв под влиянием агротехногенеза // Почвоведение. 2002. № 7. С. 867–875.

16. Beckett P.H.T. Studies of soil potassium. The “immediate” Q/I relations of labile potassium in the soils // J. Soil Sci. 1964. V. 15. №1. P. 9–23.

AGROCHEMICAL MODEL OF AGROGRAY SOIL

R.N. USHAKOV, N.A. GOLOVINA

(Ryazan State Agrotechnological University named after P.A. Kostychev)

The authors have determined the potential buffering capacity in gray heavy loamy soil in relation to potassium - PBC^k , phosphorus - PBC^p , acidification buffering capacity - EBk (buffering properties). The soil buffering properties reflect inter-phase interactions and represent a quantitative measure of the phosphorus nutrition stability of farm crops. Numerous publications have shown the influence of different fertilizers on soil buffering capacity, which manifests itself in changes of soil properties. The scientific novelty of the work is in the revealed fact that a wider variation of soil properties and their different combinations in one type of agrogray soil allow deeper understanding of the correlation of buffering properties and their components and basic agrochemical properties. The aim of the study is to determine the dependence of agrogray soil buffering properties on agrochemical properties – acidity, humus, phosphorus and potassium supply - to develop the agrochemical model of agrogray soil stability. The soil properties variation enables us to determine correlation-regression links and make probability equations. The authors have determined the potential potassium buffering using the Beckett's method, and acidification buffering capacity with a potentiometer method. They have determined that the low level of agrogray soil stability is obtained with potassium relative activity (AR_o) less than $2 \text{ M/l} \cdot 10^{-3}$, PBC^k is less than 24 units. The middle level is when AR_o is equal to $\text{M/l} \cdot 10^{-3}$, PBC^k is not less than 45 units and the high level is when AR_o is more than $\text{M/l} \cdot 10^{-3}$ and PBC^k is more than 45 units. When equilibrium concentration of phosphorus (C_{equil} in extract 0,01 M CaCl_2), desorption volume (Q_o) and potential buffering capacity is less than 0,1 mg/l, 0,7 mg P/100 g and 34 ml/g correspondingly the degree of agro-gray soil stability is low. The middle level of stability is when P_{equil} varies from 0,1 to 0,2 mg/l, Q_o ranges from 0,7 to 1,4 mg P/100 g and PBC^p is in the range between 34 and 45 ml/g. The high stability level is when P_{equil} exceeds 0,2 mg/l, Q_o is higher than 1,4 mg P/100 g and PBC^p is over 45 ml/g.

Key words: *agrogray soil, potassium activity, capacity factor, potassium buffering capacity, phosphate buffering capacity, acidification buffering capacity, physicochemical characteristics, fertility model.*

References

1. *Anan'yeva N.D.* Mikrobiologicheskiye aspekty samoochishcheniya i ustoychivosti pochv [Microbiological aspects of soil self-cleaning and stability]. M.: Nauka, 2003. 223 p.
2. *Derzhavin L.M., Frid A.S.* O kompleksnoy otsenke plodorodiya pakhotnykh zemel' [On the integrated assessment of arable land fertility] // *Agrokimiya*. 2002. No. 8. P. 5–13.
3. *Il'ina L.V.* Kompleksnoye vosproizvodstvo plodorodiya serykh lesnykh pochv i yego effektivnost'. [Complex reproduction of the fertility of gray forest soils and its efficiency]. Ryazan': Uzorech'ye, 1997. 231 p.
4. *Kirpichnikov N.A., Shil'nikov I.A., Akanova N.I., Chernyshkova L.B.* Fosfatnyy rezhim dernovo-podzolistoy pochvy v zavisimosti ot primeneniya izvestkovykh i fosfornykh udobreniy [Phosphate mode of sod-podzolic soil depending on the use of calcareous and phosphoric fertilizers] // *Plodorodiye*. 2014. No. 4 (79). P. 21–23.
5. *Lukin S.M.* Kaliynoye sostoyaniye dernovo-podzolistoy supeschanoy pochvy i balans kaliya pri dlitel'nom primenenii udobreniy [Potassium state of sod-podzolic sandy loamy soil and potassium balance in long-term fertilizer application] // *Agrokimiya*. 2012. No. 12. P. 5–14.
6. *Mineyev V.G., Gomonova N.F., Morachevskaya Ye.V.* Izmeneniye svoystv i kaliynogo sostoyaniya dernovo-podzolistoy srednesuglinistoy pochvy pri 40-letnem primenenii agrokhimicheskikh svoystv [Changes in the properties and potassium content of sod-podzolic medium loamy soil after a 40-year application of agrochemicals] // *Agrokimiya*. 2013. No. 10. P. 3–12.
7. *Nikitina L.V.* Vliyaniye dlitel'nogo primeneniya udobreniy v zernopropashnom sevooborote na kaliynyy rezhim dernovo-podzolistoy tyazhelosuglinistoy pochvy [Influence of prolonged application of fertilizers in grain-and-row crop rotation on the potassium content of sod-podzolic heavy loam soil] // *Agrokimiya*. 2012. No. 12. P. 15–23.
8. *Nikitishen V.I.* Plodorodiye pochvy i ustoychivost' funktsionirovaniya agroekosistemy [Soil fertility and the stability of agroecosystem functioning]. M.: Nauka, 2002. 258 p.
9. *Savich V.I., Platonov I.G., Dukhanin Yu.A., Povetkina N.L., Safonov A.F.* Kompleksnaya otsenka sostoyaniya kaliya v pochve [Complex assessment of the potassium content in soil] // *Izvestiya Timiryazevskoy sel'skokhozyaystvennoy akademii*. 2006. No. 3. P. 15–28.
10. *Savich V.I., Baybekov R.F., Amerguzhin K.H.A., Platonov I.G., Saduakasov N.M.* Kompleksnaya otsenka obespechennosti pochv fosfatami [Comprehensive assessment of the content of phosphates in soil] // *Izvestiya Timiryazevskoy sel'skokhozyaystvennoy akademii*. 2004. No. 1. P. 3–15.
11. *Sokolova T.A.* Vzaimodeystviye lesnykh suglinistykh podzolistykh s model'nymi kislymi osadkami i kislotno-osnovnaya bufernost' podzolistykh pochv [Interaction of forest loamy podzolic soils with model acidic sediments and acid-base buffering of podzolic soils]. M.: Izd-vo MGU, 2001. 208 p.
12. *Sychev V.G., Lunev M.I., Pavlikhina A.V.* Sovremennoye sostoyaniye t dinamika plodorodiya pakhotnykh pochv Rossii [Current state and dynamics of the fertility of arable soils in Russia] // *Plodorodiye*. 2012. No. 4 (66). P. 5–7.

13. *Chekmarev P.A., Lukin S.V.* Monitoring plodorodiya pakhotnykh pochv Tsentral'no-Chernozemnykh oblastey Rossii [Monitoring of the fertility of arable soils in the Central Black Earth regions of Russia] // *Agrokimiya*. 2013. No. 4. P. 11–22.

14. *Chernikov V.A., Milashchenko N.Z., Sokolov O.A.* Ekologicheskaya bezopasnost' i ustoychivoye razvitiye [Ecological safety and sustainable development] // *Ustoychivost' pochv k antropogennomu vozdeystviyu*. Pushchino: ONTI PNTS RAN, 2001. Book 3. 203 p.

15. *Chizhikova N.P.* Izmeneniye mineralogicheskogo sostava tonkikh fraktsiy pochv pod vliyaniem agrotekhnogeneza [Changes in the mineralogical composition of fine soil fractions under the influence of agrotechnogenesis] // *Pochvovedeniye*. 2002. No. 7. P. 867–875.

16. *Beckett P.H.T.* Studies of soil potassium. The “immediate” Q/I relations of labile potassium in the soils // *J. Soil Sci.* 1964. V. 15. №1. P. 9–23.

Ушаков Роман Николаевич – д. с.-х. н., проф. кафедры лесного дела, агрохимии и экологии ФГБОУ ВО «Рязанский государственный агротехнологический университет имени П.А. Костычева» (390044, г. Рязань, ул. Костычева, 1; тел.: 8(491)2-98-20-15; e-mail: r.usakov1971@mail.ru).

Головина Наталья Александровна – асп. кафедры лесного дела, агрохимии и экологии ФГБОУ ВО «Рязанский государственный агротехнологический университет имени П.А. Костычева» (390044, г. Рязань, ул. Костычева, 1; тел.: 8(491)2-98-20-15; e-mail: n.a.golovina1988@mail.ru).

Roman N. Ushakov – DSc (Ag), Professor of Faculty of Forestry, Agro-Chemistry and Ecology, Ryazan State Agrotechnological University named after P.A. Kostychev, (390044, Ryazan, Kostychev Str., 1; phone: +7(491)2-98-20-15; e-mail: r.usakov1971@mail.ru).

Nataliya A. Golovina – a postgraduate student of the Department of Forestry, Agro-Chemistry and Ecology, Ryazan State Agrotechnological University named after P.A. Kostychev, (390044, Ryazan, Kostychev Str., 1; phone: +7(491)2-98-20-15; e-mail: n.a.golovina1988@mail.ru).