

НЕКОТОРЫЕ ПАРАМЕТРЫ УСТОЙЧИВОСТИ АГРОСЕРОЙ ПОЧВЫ

© 2019 г. Р. Н. Ушаков^{1,*}, В. И. Левин¹, А. В. Ручкина¹, Н. А. Головина¹

¹ Рязанский государственный агротехнологический университет им. П.А. Костычева
391044 Рязань, ул. Костычева, 1, Россия

*E-mail: r.ushakov1971@mail.ru

Поступила в редакцию 27.04.2018 г.

После доработки 08.09.2018 г.

Принята к публикации 12.01.2019 г.

В агросерой тяжелосуглинистой почве определены потенциальная буферная способность по отношению к калию – PBC^K , фосфору – PBC^P , тяжелым металлам (ТМ) – PBC^{TM} , емкость буферности к подкислению – ЕБк (буферные свойства). Научная новизна работы состоит в том, что более широкая вариация почвенных свойств и их разные комбинации в пределах одного подтипа агросерой почвы позволили более детально представить корреляции между буферными свойствами и их компонентами и основными агрохимическими свойствами почв – кислотности, содержания гумуса, обеспеченности фосфором и калием – для разработки модели устойчивости агросерой почвы. Вариация почвенных свойств позволила установить корреляционно-регрессионные связи. Потенциальную калийную и фосфатную буферную способность определяли по Беккетту, буферность к подкислению – по потенциометрическим измерениям. Устойчивость почвы к загрязнению оценивали по параметрам изотерм адсорбции тяжелых металлов – максимальной адсорбции и буферной способности в области низких исходных концентраций тяжелого металла (цинком) – от 0 до 0.31 мМ/л при соотношении почва : раствор = 1 : 20 и в области высоких концентраций – от 0 до 50 мМ/л при соотношении почва : раствор = 1 : 10. Находили точки пересечения касательной, проведенной при концентрации катионов тяжелых металлов 5, 10 и 20 мМ/л. Установлено, что низкий уровень устойчивости агросерой почвы к калию достигался при относительной активности калия ($AR_o < 2 \text{ М/л} \times 10^{-3}$ ($PBC^K < 24 \text{ ед.}$), средний – при $AR_o = 4 \text{ М/л} \times 10^{-3}$ ($PBC^K \geq 45 \text{ ед.}$) и высокий – при $AR_o > 4 \text{ М/л} \times 10^{-3}$ ($PBC^K > 45 \text{ ед.}$). При равновесной концентрации фосфора ($P_{\text{равн}}$, в вытяжке 0.01 М CaCl_2), емкости десорбции (Q_0) и потенциальной буферной способности $< 0.1 \text{ мг/л}$, 0.7 мг $\text{P}_2\text{O}_5/100 \text{ г}$ и 34 мл/г соответственно степень устойчивости агросерой почвы расценивали как низкую. Средний уровень устойчивости обеспечивался при $P_{\text{равн}}$ от 0.1 до 0.2 мг/л, Q_0 – от 0.7 до 1.4 мг $\text{P}_2\text{O}_5/100 \text{ г}$ и PBC^P – от 34 до 45 мл/г; высокий уровень устойчивости при $P_{\text{равн}} > 0.2 \text{ мг/л}$, $Q_0 > 1.4 \text{ мг P}_2\text{O}_5/100 \text{ г}$ и $PBC^P > 45 \text{ мл/г}$. Для достижения среднего уровня устойчивости к тяжелым металлам величина буферной способности агросерой почвы не должна быть меньше (по изотерме адсорбции в точке концентрации 10 мМ/л) 2 л/кг для цинка, меди, кадмия и свинца. Повышение величины буферной способности к ТМ, равной 2–4 л/кг означает переход на высокий уровень устойчивости.

Ключевые слова: параметры устойчивости почвы, агросерая почва.

DOI: 10.1134/S0002188119040124

ВВЕДЕНИЕ

Устойчивость почв к неблагоприятным условиям, в равной степени как свойство любой природной системы, требует специального научного изучения и осмысления. В свете современных тенденций антропогенное воздействие на природные системы, в частности на агропочвы, неизбежно, поэтому его негативные последствия становятся все более очевидными. Опасение вызывают возможное истощение почв элементами питания [1–5], загрязнение тяжелыми металлами (ТМ) [6].

Систематизированные сведения о состоянии плодородия агропочв указывают на практически повсеместное его ухудшение: снижаются доступные формы элементов питания, повышается кислотность почвы, продолжается дегумификация. В большинстве случаев указанные процессы в агропочвах происходят синхронно, что только усиливает негативный суммарный эффект на компоненты почвенного плодородия и механизмы его устойчивости. Это повышает уязвимость агропочв к другим неблагоприятным факторам.

Понятие устойчивости почвы должно быть достаточно многогранным и определяться всей сложностью ее структурной и функциональной организации, режимности, открытости и особенности ответных реакций на внешние факторы, как эволюционно обусловленные, так и другие, не связанные с факторами почвообразования. Поэтому для почв, близких к нативным, с природным характером их развития, эволюции понятия устойчивости можно свести к способности сохранения признаков в пределах классификационных выделов (тип, подтип и т.п.). Для антропогенно-преобразованных агрогенных почв, подверженных сильным внешним воздействиям, в том числе неблагоприятным, смысл формулировки устойчивости почвы должен быть близким к гомеостазу – явлению, характерному для биологических систем. Для этого лучше подходит следующее частное определение устойчивости почвы: способность противостоять внешним воздействиям, поддерживать имеющийся режим функционирования и относительное постоянство отдельных характеристик при небольшом изменении своего состава (буферность) и не снижать некоторый уровень плодородия [7, 8].

Большинство исследователей в своих работах по изучению буферных свойств показали определяющие факторы – удобрения, минералогический, гранулометрический состав и т.п. Однако учитывая, что система буферных показателей может считаться оценочным критерием устойчивости почв, т.к. в общем понимании буферность – это устойчивость системы к изменениям, вызываемым внешними факторами. Устойчивость почвенной системы во многом зависит от стойкости, относительной стабильности состава твердофазных компонентов, их функциональной активности, определяемые через показатели буферной способности. Первые прогнозы об ухудшении или деградации минерального комплекса почвы, органического вещества, снижении устойчивости можно также сделать, исходя из показателей буферной способности.

Проблему устойчивости почв широко обсуждают в научной литературе [7, 9–13]. 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 [14]. В качестве дополнений к существующим моделям предлагается физико-химический блок, отражающий устойчивость почв, и включающий потенциальную калийную и фосфатную буферность, буферную способность к ТМ. Для всех от-

меченных выше показателей буферность – это способность жидкой и твердой фаз противостоять изменению (поддерживать стабильность) концентрации катионов (K^+ , H^+ , ионы ТМ) или анионов (PO_4^{3-}) в почвенном растворе. По-видимому, устойчивым почвам соответствуют более высокие показатели потенциальной буферной способности, т.к. они отражают иной уровень адсорбционно-десорбционных процессов, состоящие органического вещества, минерального комплекса.

Одновременно с момента организации Рязанского СХИ (1949 г.), впоследствии переименованного в Рязанский ГАТУ, на базе кафедр стали активно закладывать многолетние полевые стационарные опыты с удобрениями и способами обработки почв. К началу 2000-х гг. опыты с удобрениями практически исчерпали себя: установлена их агрохимическая, агроэкологическая эффективность (влияние на плодородие агросерой почвы, урожайность сельскохозяйственных культур в севооборотах). Определены агрохимические, агрофизические и другие параметры плодородия, систематизированные в форме модели для управления производственным процессом на экономически оправданном уровне. Установлены оптимальные для агросерых почв южного Нечерноземья формы азотных, фосфорных и калийных удобрений. Однако ценность многолетних опытов на этом не заканчивается. За более чем 50-летний период воздействия на агросерую почву сложилась и в дальнейшем только усилилась пространственная неоднородность почвенных свойств. Это позволило сформулировать новые цели и задачи с учетом перестройки мировоззренческих взглядов на агропроизводство, со смещением их в сторону агроэкологии.

Цель работы – разработать подходы в моделировании плодородия агросерой почвы для оценки и прогноза ее устойчивости к неблагоприятным воздействиям.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования служила агросерая тяжелосуглинистая иловато-пылеватая почва. В 1970 г. профессор Л.В. Ильина заложила полевой многолетний (стационарный) опыт по комплексному окультуриванию агросерой почвы (опыт 1) с внедрением систем удобрения, обработки почв, севооборотов. Результаты ее исследований отображены в монографии [14]. Полевой зернопропашной севооборот включал в порядке последовательного чередования викоовсяную

Таблица 1. Дозы удобрений, примененные в опытах с минеральной системой удобрения (опыты 2, 3, 4), кг/га

Вариант	Культура											
	яровая пшеница, ячмень			картофель			вика + овес			озимая пшеница		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
1	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
2	–	60	60	–	100	100	–	60	60	–	–	–
3	60	60	60	100	100	100	30	60	60	–	–	–
4	60	–	60	80	–	40	30	–	60	60	–	60
5	60	60	60	80	40	40	30	60	60	60	60	60
6	60	60	–	60	60	–	30	60	–	60	60	–
7	60	60	60	60	60	60	30	60	60	60	60	60

Примечание. Варианты: 1 – без удобрений, 2 – фон РК (суперфосфат простой + хлористый калий), 3 – фон РК + N (разные формы азотных удобрений), 4 – фон НК (аммиачная селитра + 40%-ная калийная соль), 5 – фон НК + P (разные формы фосфорных удобрений), 6 – фон NP (аммиачная селитра + суперфосфат простой), 7 – фон NP + K (разные формы калийных удобрений).

смесь (на сено), озимую пшеницу, картофель, ячмень и овес. В последнее время возделывали картофель сорта Невский, ячмень сорта Московский 2, вику сорта Львовская 31/292, овес сорта Горизонт, озимую пшеницу сорта Московская 39. Дозы удобрений рассчитывали на основании планируемого урожая и содержания элементов питания в почве. Опыт заложен методом расщепленных делянок, варианты обработки почвы в повторениях – методом рендомизации. Повторность четырехкратная. Размер делянки 3-го порядка – 465 м², учетной делянки – 100–250 м². В данном опыте практиковали органо-минеральную систему удобрения.

По инициативе профессора Е.А. Жорикова в 1962 г. был заложен многолетний опыт по изучению эффективности разных форм азотных удобрений (опыт 2). Для решения поставленных задач были взяты варианты без удобрений, с кальциевой селитрой (N_{скл}) и хлористым аммонием (N_х). Дозы удобрений показаны в табл. 1. Опыт заложен в четырехкратной повторности. Размер делянок 210 м².

Начиная с 1967 г., проводили испытание различных форм фосфорных удобрений (опыт 3). В настоящем исследовании были взяты варианты без удобрений и с применением двойного суперфосфата (P_{сд}). Дозы удобрений показаны в табл. 1. Опыт заложен в четырехкратной повторности. Размер делянок 156.8 м².

Многолетний опыт по изучению влияния разных форм калийных удобрений (опыт 4) на продуктивность культурных растений в условиях агросерых тяжелосуглинистых почв был заложен в 1967 г. Н.И. Красеньковой. В настоящем исследо-

вании был использован вариант с 40%-ной калийной солью на азотно-фосфорном фоне, включавший применение сернокислого аммония и простого суперфосфата. Опыт заложен в трехкратной повторности. Размер делянок 210 м². Подробно схема опытов 2, 3, 4 с минеральной системой удобрения приведена в работе [15].

В исследовании буферности почв кроме контроля вариантами были: на фосфорно-калийном фоне – применение хлористого аммония (фон РК + N_х), кальциевой селитры (фон РК + N_{скл}), на азотно-калийном фоне – суперфосфат двойной (фон НК + P_{сд}). В исследованиях буферной способности к ТМ выбрали вариант комплексного применения минеральных удобрений, включавший аммиачную селитру, калийную соль и суперфосфат двойной. Данные удобрения использованы в опытах по определению фосфатной и калийной буферности, минералогических и других показателей.

Для изучения органической системы удобрения включили в сравнительный анализ высокоплодородный вариант агросерой почвы, характеризующий потенциальные, экологические, продукционные и иные возможности плодородия. Для этого был заложен полевой опыт (опыт 5) по интенсивному окультуриванию агросерой почвы. Схема опыта включала 2 варианта: без удобрений, отражающий, судя по агрохимическим сведениям, неплодородную почву (*III*), и с навозом (*III*). Для этого на протяжении 5 лет в агросерую почву ежегодно вносили под картофель подстилочный навоз КРС из расчета 40 т/га. Контрольный вариант представляла почва, в которую за последние 10 лет удобрения не вносили.

Таблица 2. Агрохимические свойства агросерой почвы (слой 0–20 см)

Вариант, система удобрения	Гумус, %	P ₂ O ₅	K ₂ O	рН _{KCl}	H _г	Ca ²⁺ + Mg ²⁺
		мг/100 г			мг-экв/100 г	
Опыт 1						
Без удобрений (контроль 1)	2.1 ± 0.2	12.3 ± 0.9	14.4 ± 0.9	5.7 ± 0.1	2.6 ± 0.1	24.1 ± 0.3
Органо-минеральная система удобрения	3.0 ± 0.2	32.0 ± 0.4	24.1 ± 0.4	5.9 ± 0.2	1.9 ± 0.01	26.0 ± 0.4
Опыт 2, 3, 4						
Без удобрений (контроль 2)	2.2 ± 0.3	7.3 ± 0.4	8.6 ± 0.4	5.5 ± 0.2	3.0 ± 0.1	22.6 ± 0.4
Фон НК + P _{сд}	2.3 ± 0.2	25.7 ± 0.4	23.0 ± 0.5	5.0 ± 0.2	4.6 ± 0.1	18.9 ± 0.5
Фон РК + N _х	2.3 ± 0.1	26.1 ± 0.3	23.3 ± 0.5	4.4 ± 0.2	6.1 ± 0.0	14.5 ± 0.5
Фон РК + N _{скц}	2.3 ± 0.2	26.5 ± 0.4	22.0 ± 0.1	5.0 ± 0.3	4.5 ± 0.1	20.0 ± 0.5
Фон НР + K _{кк}	2.3 ± 0.2	24.7 ± 0.3	24.1 ± 0.4	5.4 ± 0.4	3.5 ± 0.1	22.0 ± 0.6
Опыт 5						
Без удобрений (контроль 3) – НП	2.0 ± 0.3	11.0 ± 2.2	7.0 ± 1.0	5.5 ± 0.1	3.1 ± 0.1	23.0 ± 0.7
Навоз 40 т/га – ПП	5.4 ± 0.7	46.6 ± 1.0	40.7 ± 2.3	6.0 ± 0.3	1.3 ± 0.1	46.3 ± 0.6

Примечание. НП – неплодородная почва, ПП – плодородная почва.

Опыт заложен в трехкратной повторности методом рендомизации. Размер делянок 300 м². Агрохимическая характеристика почвы показана в табл. 2.

Для изучения влияния плодородия агросерой почвы на устойчивость к подкислению использованы почвенные образцы опыта 5 для прогнозирования изменения емкости буферности к подкислению (ЕБк). Для этого провели модельное подкисление почвы разбавленной соляной кислотой, изменив начальную точку титрования. Кислотная нагрузка составила 4.7×10^{-6} М/100 г (рН₁), 11×10^{-6} (рН₂) и 30×10^{-6} (рН₃) М/100 г, что было эквивалентно величинам рН 5.33, 4.96 и 4.52. Контроль – фоновая кислотность (рН₀) (лабораторный опыт 5.1).

Длительное применение минеральных и органических удобрений на опытных полях привело к формированию различных в вариантах агрохимических свойств почв. Их пространственная вариабельность позволила установить корреляционные связи с буферными свойствами почвы.

Лабораторные анализы осуществляли общепринятыми методами и по соответствующим ГОСТам. В почвенных образцах определяли обменную кислотность рН_{KCl} – потенциометрическим методом (ГОСТ 26483-85), гидролитическую кислотность – по методу Каппена в модификации ЦИНАО (ГОСТ 26212-91), актуальную кислотность – по методике, описанной в практике [16], сумму поглощенных оснований – по

методу Каппена–Гильковица в модификации ЦИНАО (ГОСТ 27821-88), гумус – по Тюрину в модификации ЦИНАО (ГОСТ 26213-91), подвижные Р₂O₅ и К₂O – по Чирикову в модификации ЦИНАО (ГОСТ 26204-91), легкоподвижный калий (К₂O_{легк}) – извлечением калия вытяжкой 0.01 М СаСl₂ (ОСТ 10-271-2000), степень подвижности фосфатов – по методу Карпинского–Замятиной в вытяжке 0.015 М К₂SO₄ (фактор интенсивности) при соотношении почвы к раствору 1 : 5. При определении фосфатной буферности использовали вытяжку 0.01 М СаСl₂ (Р_{равн}) [16].

Потенциальную буферную способность по отношению к калию (линейную) определяли по [17]. Для получения Q/I-изотерм серию навесок каждого образца почвы перемешивали в течение 30 мин с 10 мл раствора 0.01 М СаСl₂, содержащего различное количество калия (раствор КСl от 0.2 до 1.0 мг-экв/л). В равновесных растворах определяли величины ±ΔК и AR. Показатель ±ΔК представляет собой количество подвижного калия, которое почва отдает (–ΔК) или поглощает (+ΔК) к моменту установления равновесия между калием почвы и калием раствора, показатель AR равен отношению активностей ионов калия и кальция. Изотерму сорбции, представляющую собой линию, прямую в верхней части и изогнутую в нижней, строили в координатах ΔК и AR. Пересечение ее с осью абсцисс дает величину AR₀, соответствующую отношению активностей $aK + \sqrt{aCa^{2+}}$ в растворе СаСl₂–КСl, при котором

почва не поглощает и не отдает калий. На основе сорбционной кривой рассчитывали непосредственно доступный калий $-\Delta K_0$. Отношение $-\Delta K_0/AR_0$ выражало потенциальную буферную способность почв в отношении калия.

Для изучения влияния содержаний калия, гумуса, кислотности (почвенные условия) на формирование калийной буферности с опытных участков были отобраны почвенные образцы. Образцы отличались по содержанию подвижного калия (от 8.0 до >20 мг/100 г), легкоподвижного – (от 0.3 до 2.0 мг/100 г), гумуса – (от 1.7 до 5.0%), обменной кислотности (в солевой вытяжке) – от pH_{KCl} 4.4 до 6.2. Вариация позволила определить различные комбинации условий, и на их основе установить линейные математические зависимости калийной буферности и ее компонентов (факторы емкости и интенсивности) от содержания калия, величины pH , содержания гумуса, а также сделать приближенные (ориентировочное) прогнозные оценки изменения калийной буферности от отмеченных агрохимических показателей. Потенциальную буферную способность почв по отношению к фосфору (PBC^P) определяли по [17].

Устойчивость почвы к загрязнению оценивали параметрами изотерм адсорбции T_M – максимальной адсорбции и буферной способности в области низких исходных концентраций катиона T_M (цинка) – от 0 до 0.31 мМ/л при соотношении почва : раствор = 1 : 20 [6, 18] и в области высоких концентраций – от 0 до 50 мМ/л при соотношении почва : раствор = 1 : 10. Находили точки пересечения касательной, проведенной при равновесной концентрации T_M 5.0, 10 и 20 мМ/л. В этом случае буферную способность (BC) определяли как тангенс угла наклона.

Для определения буферности к подкислению использовали метод непрерывного потенциометрического титрования ($НПТ$) [18]. О величине емкости буферности к подкислению ($ЕБк$) судили по количеству титранта, необходимого для изменения pH на заданную величину.

Для статистической обработки экспериментальных данных применяли методы дисперсионного, корреляционного, регрессионного и других видов статистического анализа [19, 20] с использованием программного комплекса “STATISTICA”.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Устойчивость почвы к подкислению. К настоящему времени в Рязанской обл. средневзвешенная величина pH пахотных почв составляет 5.3. На долю кислых почв приходится $\approx 73\%$, из них

сильнокислых почв – 4, среднекислых – 26, слабокислых – 42%. В некоторых районах с выщелоченными и оподзоленными черноземами доля почв с $pH < 5.5$ доходит до 80–90%. Средневзвешенная величина pH под сенокосами еще меньше – 4.7 ед.

Для установления зависимости $ЕБк$ от количества поглощенных оснований, разных видов кислотности были проанализированы почвенные образцы, отобранные в многолетних опытах 2, 3 и 4. Установлена зависимость $ЕБк$ от содержания поглощенных оснований – $y = 7.7 + 3.6x$ ($r = 0.77$), кислотности (pH_{KCl}) – $y = -122.5 + 39.3x$ ($r = 0.89$), актуальной кислотности (pH_{H_2O}) – $y = -170.4 + 39.5x$ ($r = 0.90$), гидролитической кислотности – $y = 134.4 - 12.4x$ ($r = -0.85$).

В контроле содержание гумуса было равно 2.1–2.2%, pH_{KCl} 5.5–5.7, $ЕБк$ – 7.6 мМ-экв/100 г. При подкислении агросерой почвы до pH 4.4 (длительное внесение хлористого аммония) величина $ЕБк$ снизилась в 1.8 раза – до 4.2 мМ-экв/100 г. С увеличением содержания гумуса в почве до 3.0% при pH_{KCl} 5.9 (опыт 1 с органоминеральной системой удобрения) показатель $ЕБк$ улучшился и составил 10.8 мМ-экв/100 г. При дальнейшем увеличении содержания гумуса до 5.4% (опыт 5) ожидали величину $ЕБк$ на уровне 46.3 мМ-экв/100 г. (различия в сравнении с контрольным вариантом были достоверными при $p < 0.05$).

В неплодородной (неокультуренной) и плодородной (окультуренной) агросерой почве, несмотря на близкие для них величины начальной точки титрования ($НТТ$) (pH 7.3–7.4), показатель общей буферности к подкислению между вариантами различался на 30 мМ-экв/кг. Более высокие интервальные изменения буферности свидетельствовали о лучшем состоянии почвенных компонентов плодородной почвы, ответственных за реализацию процессов нейтрализации ионов водорода. После воздействия кислоты на почву $ЕБк$ снизилась во всех вариантах, но в большей степени в неплодородной почве при кислотных нагрузках 4.7, 11.9 и 30 М/100 г. $ЕБк$ составила в неплодородной почве 57, 45 и 48 мМ-экв/кг, в плодородной – 175; 165 и 155 мМ-экв/кг соответственно.

Агрохимический аспект устойчивости. К настоящему времени созданы условия для истощения почв. Среднее содержание подвижного фосфора в пахотных почвах Рязанской обл. составляет ≈ 11.0 мг/100 г почвы с наибольшими показателями (>10 мг/100 г) в дерново-подзолистых и агросерых почвах. В черноземах выщелоченных и оподзоленных содержание фосфора в большин-

Таблица 3. Уравнения для прогноза калийного состояния агросерой почвы

Условие	x		
	AR ₀ , М/л ^{0.5}	–ΔK ₀	+ΔK ₀
		мг-экв/100 г	
Содержание гумуса, %			
<2.0	$y = -1.15 + 1295x$	$y = -2.70 + 60.8x$	$y = 5.8 + 0.30x$
>2.0	$y = -0.25 + 92.9x$	$y = -0.23 + 13.6x$	$y = 4.3 + 0.34x$
K ₂ O _{подв} , мг/100 г			
<10	$y = -0.63 + 2185x$	Не установлено	$y = -8.22 + 0.62x$
K ₂ O _{подв} от 10 до 20	$y = -0.89 + 1319x$	$y = -0.70 + 54.2x$	$y = -3.07 + 0.23x$
>20	$y = -0.40 + 85x$	$y = -0.90 + 11.4x$	$y = -3.47 + 0.21x$
K ₂ O _{подв} <10, гумус <2.5%	$y = -1.04 + 11020x$	Не установлено	$y = -9.39 + 0.75x$
K ₂ O _{подв} от 10 до 20, гумус <2.5%	$y = -1.03 + 1189x$	$y = -1.08 + 55x$	$y = -2.60 + 0.19x$
K ₂ O _{подв} >20, гумус <2.5%	$y = -5.59 + 3679x$	$y = -56.5 + 104.7x$	$y = -3.40 + 0.20x$
K ₂ O _{подв} <10, гумус >2.5%	$y = 1.03 + 1769x$	Не установлено	$y = 41.3 + 2.83x$
K ₂ O _{подв} от 10 до 20, гумус >2.5%	$y = 1.10 + 3560x$	$y = 0.24 + 115.6x$	$y = 6.74 + 0.54x$
K ₂ O _{подв} >20, гумус >2.5%	$y = 0.69 + 62.9x$	$y = 1.05 + 8.09x$	Не установлено
Гумус, %			
<2.5, рН _{KCl} <4.5	$y = -3.40 + 2510x$	$y = -2.82 + 55.4x$	$y = -20.1 + 1.05x$
<2.5, рН _{KCl} >4.5	$y = -0.93 + 1192x$	$y = -0.77 + 43.2x$	$y = -2.9 + 0.22x$

Примечание. y – вероятная величина показателя, %; x – вероятные величины параметров калийной буферности.

стве случаев не превышает 10 мг/100 г. На долю почв со средним содержанием фосфора приходится 36, с повышенным – 18%. Каждое 5-е поле имеет очень низкое и низкое содержание фосфора.

Средневзвешенное содержание подвижного калия в пахотных почвах области варьирует от 8 до 14 мг/100 г. На долю почв I и II классов обеспеченности приходится 28, III класса – 32%. Поэтому целесообразно показать зависимость калийной и фосфатной буферности от основных агрохимических свойств почв.

Проблеме калийного состояния почв посвящены многочисленные исследования [21–24]. В них отмечено влияние удобрений на калийный режим, формы почвенного калия, калийную буферность.

Калийная и фосфатная буферность, как показатели межфазовых взаимодействий, являются количественной мерой устойчивости питания сельскохозяйственных растений калием и фосфором. Более широкая вариация почвенных свойств и их разные комбинации позволяют рассчитать корреляции калийной и фосфатной буферности и ее компонентов от агрохимических свойств почв.

От содержания гумуса (x) зависит активность калия, при котором почва не поглощает и не отдает калия (AR₀). Уравнение регрессии имеет вид: $y = -0.0098 + 0.0046x$. Предложено для средней и высокой степени устойчивости функционирования агросерых суглинистых почв уровень величины AR₀, соответствующий 2.0–4.0 и 4.0–7.0 × 10⁻³ М/л^{0.5} [25]. В исследованном случае такие величины активности возможны при ориентировочном содержании гумуса 2.5–2.9% и 2.9–3.5% соответственно.

Исходя из зависимости AR₀ от K₂O_{подв}, имеющей вид $y = -0.0045 + 0.0004x$, содержание последнего должно быть для средней степени устойчивости ≥17–22 мг/100 г, для высокой – 22–30 мг/100 г.

При содержании гумуса <2.5% вероятная величина AR₀ составит 1.7 × 10⁻³ М/л^{0.5}, что соответствует низкой степени устойчивости; если содержание гумуса >2.5%, то AR₀ превысит 10 × 10⁻³ М/л^{0.5}; величины показателей –ΔK (десорбционная ветвь) и +ΔK (адсорбционная ветвь) при содержании гумуса <2.5% ожидаются соответственно ≈0.061 и 22.7 мг-экв/100 г, при содержании гумуса >2.5% – 0.090 и 15.6 мг-экв/100 г (табл. 3).

При содержании $K_2O_{\text{подв}} > 10$ мг/100 г и от 10 до 20 мг/100 г почвы степень устойчивости была низкой, т.к. по расчетам AR_0 не превышала 2.0×10^{-3} М/л^{0.5}. Если содержание $K_2O_{\text{подв}} > 20$ мг/100 г, то можно достичь высокой степени устойчивости почвы по показателю AR_0 , величина которой превышает 7×10^{-3} М/л^{0.5}. При различных комбинациях содержаний $K_2O_{\text{подв}}$ и гумуса получена следующая закономерность: максимальное повышение AR_0 до 16.5×10^{-3} М/л^{0.5} при увеличении количества гумуса (>2.5%) отмечено только на фоне обеспеченности агросерой почвы $K_2O_{\text{подв}}$ не меньше средней.

Полученные величины AR_0 при математической обработке, включавшей комбинации содержаний $K_2O_{\text{подв}}$ и гумуса <2.5%, были меньше по сравнению с расчетами без учета содержания гумуса. Сравнение этих величин позволило оценить участие гумуса в формировании показателя AR_0 . Для диапазона $10 > K_2O > 0$ вклад гумуса составил 26, при содержании $K_2O > 20$ мг/100 г – 12%.

Уравнением Дубинина–Радушкевича была аппроксимирована та ветвь экспериментальной изотермы, которая проходит выше оси абсцисс (+ΔК) и указывает на адсорбцию калия. Знак коэффициента регрессии в уравнении $y = 28.5 - 2.8x$ позволил заключить, что чем кислее почва, тем больше поглощается калия. Установлено, что если содержание гумуса <2.5% и $pH_{KCl} < 4.5$, то величина –ΔК возрастала в 1.8 раза (до 0.07 мг-экв/100 г) по сравнению с $pH_{KCl} > 4.5$. В кислой среде ожидали также увеличение поглощения калия на 2.0–3.0 мг-экв/100 г (+ΔК = 20 мг-экв/100 г).

Показатель потенциальной буферной способности по отношению к калию (PBC^K) возрастал при увеличении содержания гумуса в почве. В 44% случаев при содержании гумуса <2.5% величина PBC^K превышала 20 ед., при этом содержание $K_2O_{\text{подв}}$ в области $pH_{KCl} < 5.0$ изменялось от 8 до 15 мг/100 г, при $pH_{KCl} > 5.0$ – от 19 и больше. В 32% случаев содержание гумуса более, чем 2.5%, привело к увеличению $PBC^K > 20$ ед., однако это было возможно только при обеспеченности почвы $K_2O_{\text{подв}}$ ниже средней.

В 40% случаев PBC^K возросла до 41 ед. на фоне обеспеченности калием, не превышающей 20 мг/100 г, что было обусловлено не только незначительной активностью калия, но и низким содержанием гумуса (<2.5%), т.е. дегумификацией илистых фракций, о чем свидетельствовали высокий показатель +ΔК – 18–20 мг-экв/100 г. Такая же величина PBC^K (41 ед.) для агросерой

Таблица 4. Влияние содержания калия (мг/100 г) и гумуса (%) на компоненты калийной буферности агросерой тяжелосуглинистой почвы

Условие	AR_0 , 10^{-3} М/л	$-\Delta K_0$, мг-экв/100 г	PBC^K
$K_2O_{\text{подв}} < 12$	$\leq 0.5 \pm 0.0003$	$\leq 0.01 \pm 0$	20
$K_2O_{\text{подв}}$ от 12 до 20	3.5 ± 0.0014	0.1 ± 0.07	29
$K_2O_{\text{подв}}$ от 12 до 20, содержание гумуса от 2.5 до 3.5	4.5 ± 0.0002	0.20 ± 0.005	44
$K_2O_{\text{легк}} < 1.0$	$\leq 0.7 \pm 0.0012$	$\leq 0.01 \pm 0$	14
$K_2O_{\text{легк}}$ от 1.0 до 2.0	1.3 ± 0.0011	0.04 ± 0.001	31

почвы могла быть при высокой ее обеспеченности калием и гумусом (3.0% и больше).

Исходя из полученных экспериментальных данных и учитывая приемлемую для средней степени устойчивости агросерой почвы относительную активность калия, равную 0.002–0.003 М/л, рассчитали необходимое содержание гумуса и $K_2O_{\text{подв}} - 2.6-2.8\%$ и 17.1–19.7 мг/100 г соответственно. При таких показателях вероятная величина ΔК составила 0.044–0.060 мг-экв/100 г. В соответствии с приведенными расчетами, основанными на регрессионных уравнениях, показатель $PBC^K = 22$. Это не самый оптимальный показатель буферной способности, т.к. есть возможность в агросерой тяжелосуглинистой почве за счет комплексного ее окультуривания повысить показатель +ΔК до 0.09 мг-экв/100 г. При такой сорбционной способности содержание гумуса должно быть равно 3.9%, содержание $K_2O_{\text{подв}} - 26$ мг/100 г. Если принять за среднюю степень устойчивости $AR_0 = 0.002-0.003$ М/л, то величина PBC^K составит 30–45 ед.

Следовательно, устойчивость калийного режима складывалась при содержании гумуса в агросерой почве >2.0%, $K_2O_{\text{подв}} - \geq 17-20$ мг/100 г и $pH_{KCl} > 5.0$. Увеличение содержания гумуса приводило к повышению AR_0 и улучшению функционального состояния ППК. При содержании $K_2O_{\text{подв}}$ и $K_2O_{\text{легк}}$ в почве соответственно <12 и 1 мг/100 г AR_0 элемента была крайне низкой ($0.5-0.7 \times 10^{-3}$ М/л). При возрастании количества $K_2O_{\text{подв}}$ в 2 раза величина AR_0 возросла в 7 раз, – $\Delta K_0 -$ в 10 раз, $PBC^K -$ в 2.2 раза (табл. 4).

Считается, что наиболее благоприятным фосфатным режимом обладает почва с относительно высокими буферными свойствами, обусловленными не поглощением фосфора твердой фазой, а его десорбцией. В настоящем исследовании, про-

Таблица 5. Параметры уравнения Ленгмюра адсорбции ТМ агросерой почвой в зависимости от систем удобрения

Вариант (система удобрения)	$1/(Q_{\max} \times K)$	$1/Q_{\max}$	Q_{\max} , мМ/кг	K	$-\Delta G$, кДж/моль
Цинк					
Без удобрений	0.0846	0.0080	125	0.09	11.1
Минеральная	0.0906	0.0070	143	0.08	10.6
Органо-минеральная	0.0771	0.0081	123	0.11	11.3
Медь					
Без удобрений	0.0606	0.0097	103	0.16	12.4
Минеральная	0.0670	0.0098	102	0.15	12.1
Органо-минеральная	0.0559	0.0096	104	0.17	12.5
Кадмий					
Без удобрений	0.0868	0.0108	93	0.12	11.7
Минеральная	0.0877	0.0118	85	0.13	11.9
Органо-минеральная	0.0762	0.0117	85	0.15	12.3
Свинец					
Без удобрений	0.0712	0.0076	132	0.11	11.4
Минеральная	0.0246	0.0164	61	0.37	14.8
Органо-минеральная	0.0468	0.0105	95	0.22	13.2

веденном на агросерых тяжелосуглинистых почвах, в 36% случаев имело место одновременное увеличение содержания фосфора в растворе ППК и показателя PBC^P относительно контроля, равного 25 мг/г. Оптимальные условия для этого были следующими: содержание гумуса – в среднем 3.0%, $pH_{KCl} \approx 5.3$, содержание равновесного фосфора ($P_{равн}$) – 0.15 мг/л. В 32% случаев происходило уменьшение как показателя PBC^P , так и величины y_0 при условии, если содержание гумуса < 2.5%, $P_{равн} < 0.11$ мг/л и возрастания кислотности почвенного раствора до pH_{KCl} 4.6. Установлено, что если содержание $P_{равн} \leq 0.11$ мг/л, гумуса $\leq 2.5\%$, то величина начальной адсорбции фосфора (Q_0) составит 0.68 мг/100 г. Если величины отмеченных выше параметров увеличивались соответственно до 0.15 мг/л и 3.5%, то показатели Q_0 возрастали до 1.35 мг/100 г и PBC^P – с 34 до 45 мг/г. Принимали величины $PBC^P = 34$ –45 мг/г, $Q_0 = 0.6$ –1.3 мг/100 г и концентрацию $P_{равн} = 0.1$ –0.2 мг/л за средний уровень устойчивости агросерой почвы, меньшие величины показателей – за низкий уровень.

Устойчивость почвы к загрязнению. В табл. 5 представлены параметры, характеризующие адсорбцию почвой ТМ. Агросерая почва обладала наибольшей адсорбирующей способностью к свинцу, менее – к кадмию, цинку и меди. В контроле Q_{\max} составила соответственно в порядке указанных элементов 132 мМ/кг (27 мг/кг),

93 (10), 125 (8) и 103 мМ/кг (7 мг/кг); при применении минеральной системы удобрения – 61 (13), 85 (10), 143 (9) и 102 мМ/кг (6 мг/кг) соответственно.

Ослабления устойчивости агросерой почвы к загрязнению цинком и медью при длительном внесении минеральных удобрений не установлено, т.к. величина максимальной адсорбции (Q_{\max}) для цинка превышала Q_{\max} в контрольном варианте на 18 мМ-экв/кг, для меди была близкой к нему (123–125 мМ-экв/кг). Вызывало опасение загрязнение почвы кадмием и в особенности свинцом: Q_{\max} составила всего 61 мМ-экв/кг (по Ленгмюру).

Результаты исследования позволили выделить 3 уровня устойчивости агросерой почвы к загрязнению с учетом конкретных почвенных условий. Низкий уровень устойчивости почвы проявлялся при величине Q_{\max} (по Ленгмюру) < 91 мМ/кг для цинка, < 104 мМ/кг для меди, < 93 мМ/кг для свинца и < 61 мМ/кг для кадмия; средний уровень устойчивости обеспечивался для цинка, меди и свинца в диапазоне от 91 до 143 мМ/кг, 104–130 мМ/кг и 61–132 мМ/кг соответственно; высокий уровень устойчивости почвы был гарантирован, если величина Q_{\max} превышала 93–143 мМ/кг для всех изученных ТМ.

Для достижения среднего уровня устойчивости величина показателя буферной способности агросерой почвы не должна быть меньше (по изо-

Таблица 6. Модель устойчивости плодородия агросерой тяжелосуглинистой почвы

Показатель	Единица измерения	Уровень устойчивости почвы		
		низкий	средний	высокий
Гумус	%	<2.0	2.0–3.0	>3.0
pH _{KCl}		<4.5	4.5–6.0	>6.0
Подвижный калий	мг/100 г	<12.0	12.0–17.0	>17.0
Подвижный фосфор	мг/100 г	<7.0	7.0–15.0	>15.0
Общая во всех интервалах рН емкость буферности к подкислению (ЕБк)	мМ-экв/100 г	<9.0	9.0–11.0	>11.0
Поглощенные основания (Ca ²⁺ + Mg ²⁺)	мг-экв/100 г	<20	20–25	>25
Максимальная адсорбция (Q _{max}) по Ленгмюру	мМ/кг			
цинка		<91	91–143	>143
меди		<104	104–130	>130
кадмия			<93	>93
свинца		<61	61–132	>132
Буферная способность к ТМ (БСТ TM) по изотерме адсорбции в точке концентрации	Фактор интенсивности, мМ/л фактор емкости, мМ/кг		Цинк	
5		<4.0	4.0–7.0	>7.0
10		<2.0	2.0–4.0	>4.0
			медь	
5		<5	5–6	> 6
10		<2	2–3	> 3
			Кадмий	
5			<4.0	>4.0
10			<2.0	>2.0
			Свинец	
5		<2.0	2.0–6.0	>6.0
10		<1.0	1.0–4.0	>4.0
Относительная активность калия (AR ₀)	М/л × 10 ⁻³	<2.0	2.0–4.0	>4.0
Потенциальная калийная буферность (РБС ^K)	Фактор емкости, мг-экв/100 г	<24	34–45	>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 ₂ O ₅ /100 г	<0.7	0.7–1.4	>1.4
Потенциальная фосфатная буферность (РБС ^P)	мл/г	<34	34–45	>45

терме адсорбции в точке концентрации 10 мМ/л) 2 л/кг для цинка, меди, кадмия и свинца. Превышение величины РБСTM, равной 2–4 л/кг, означал переход на высокий уровень устойчивости.

Модель устойчивости агросерой почвы. Настоящее исследование было проведено на базе много-

летних стационарных опытов с удобрениями, длительность которых составила >40 лет. За это время в агросерой почве опытной станции сложились различные вариации почвенных условий с содержанием гумуса, подвижных форм фосфора и калия, кислотностью и т.п. Опыт с органическими удобрениями по окультуриванию агросерой

почвы указанные вариации расширил, разнообразил. Это дало основание для установки влияния основных почвенных свойств на формирование различных показателей буферности, которые отражают устойчивость почв к неблагоприятным воздействиям – возможному истощению элементами питания, загрязнению ТМ, подкислению. Хорошо известно, что из почвенных компонентов самыми высокими показателями емкости катионного обмена обладают гумусовые вещества, но на их сорбционные свойства большое влияние оказывают условия среды, например, кислотность. Во многом от содержания гумуса будет зависеть формирование показателей буферности, устойчивости почвы. Поэтому одним из главных критериев градации устойчивости является содержание гумуса. В опытах его содержание менялось от 2 до 5%. Для агросерой тяжелосуглинистой почвы 2% гумуса и меньше – низкие показатели [14]. По-видимому, такие почвы не будут обладать надежной устойчивостью, в особенности на фоне повышенной кислотности. В этой связи отметим такую устойчивость как низкую. В агросерой почве можно поддерживать содержание гумуса на уровне 3.0%. В этом случае возьмем за основу средний уровень устойчивости. В производственных условиях агросерые почвы Рязанской обл. обычно не содержат гумуса >3%. Однако эту величину не следует считать предельной. Повышение содержания гумуса в почве, указывающее на высокую культуру земледелия, создает условия для улучшения буферных свойств. В этом случае уровень устойчивости почв можно расценить как высокий. При всех уровнях градации проводили поправки на кислотность, содержание подвижных форм элементов питания, которые оценивали показателями буферности. Поэтому при разработке модели устойчивости агросерой почвы учитывали динамичность комплекса почвенных условий.

Современные модели плодородия в основном включают агрохимические, физические, биологические и другие показатели, которые позволяют оценить, спрогнозировать уровень продукционного процесса сельскохозяйственных растений. Наша модель указывает на условия, необходимые для реализации устойчивого продукционного процесса.

Количественной и качественной мерами реализации механизмов устойчивости являются предложенные в табл. 6 показатели, отражающие 3 уровня устойчивости почвы: относительно низкий, средний и высокий. Длительность полевых многолетних опытов и их схемы позволили получить достоверный экспериментальный материал

и в сравнительном изучении вариантов ранжировать как минимум 3 состояния указанных физико-химических параметров, а значит функционирования почвы, соответствующие условно низким, среднему и высокому уровням устойчивости.

При активности калия $< 2 \text{ М/л} \times 10^{-3}$ ($PBC^K < 24$), $2-4 \text{ М/л} \times 10^{-3}$ ($45 > PBC^K > 24$) и более $4 \text{ М/л} \times 10^{-3}$ ($PBC^K < 24$) достигаются соответственно низкий, средний и высокий уровни устойчивости агросерой почвы.

При $P_{\text{равн}}$ в вытяжке 0/01 М CaCl₂, емкости десорбции и потенциальной буферной способности $< 0/1 \text{ мг/л}$, $0/7 \text{ мг P}_2\text{O}_5/100 \text{ г}$ 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 мг/л, Q_0 – от 0.7 до 1.4 мг P₂O₅/100 г и PBC^P – от 34 до 45 мл/г; высокий уровень устойчивости при $P_{\text{равн}} > 0.2 \text{ мг/л}$, $Q_0 > 1.4 \text{ мг P}_2\text{O}_5/100 \text{ г}$ и $PBC^P > 45 \text{ мл/г}$.

Если величины буферности к подкислению находятся в диапазоне 9.0–11 мМ-экв/100 г, то достигается средний уровень устойчивости почвы. При этом поглощенных оснований должно быть $\geq 20 \text{ мг-экв/100 г}$. Не рекомендуется снижение емкости буферности к подкислению до величин $< 9 \text{ мМ-экв/100 г}$.

С учетом динамического состояния почв предложенная модель плодородия является ориентировочной для агросерой тяжелосуглинистой почвы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Агросерые почвы южной части Нечерноземной зоны РФ в целом характеризуются как среднекислые. В структуре пахотных почв они занимают 38%. На фоне дегумификации почв, применения физиологически кислых удобрений буферность к подкислению агросерых почв ухудшалась за счет уменьшения емкости буферности к кислоте. Длительное использование хлористого аммония в дозе 60 кг д.в./га могло снизить величину pH агросерой тяжелосуглинистой почвы при содержании гумуса от 2.1–2.2% до 4.4, емкости буферности к кислоте – до 4.17 мМ-экв/100 г. Для сравнения при pH 5.7 емкость буферности составляла 7.63 мМ-экв/100 г.; при кислотности почвы близкой к нейтральной, но увеличении содержания гумуса до 3.0%, величина емкости буферности к кислоте могла повыситься до 10.8 мМ-экв/100 г.

Низкий уровень устойчивости почвы проявлялся при величине максимальной адсорбции по Ленгмюру $< 91 \text{ мМ/кг}$ для цинка, $< 104 \text{ мМ/кг}$ для меди, $< 93 \text{ мМ/кг}$ для свинца и $< 61 \text{ мМ/кг}$ для кад-

мия; средний уровень устойчивости обеспечивался для цинка, меди и свинца в диапазоне от 91 до 143 мМ/кг, 104–130 мМ/кг и 61–132 мМ/кг соответственно; высокий уровень устойчивости почвы был гарантирован, если показатель максимальной адсорбции превышал 93–143 мМ/кг для всех изученных тяжелых металлов.

Для достижения среднего уровня устойчивости величина буферной способности агросерой почвы не должна быть меньше (по изотерме адсорбции в точке концентрации 10 мМ/л) 2 л/кг для цинка, меди, кадмия и свинца. Превышение величины буферной способности к ТМ 2.0–4.0 л/кг означало переход на высокий уровень устойчивости.

Для достижения оптимальной активности калия 0.002–0.0035 М/л, содержание гумуса должно быть $\geq 3.0\%$, подвижного калия – 20 мг/100 г. При повышении содержания гумуса 3.0% ($\leq 3.5\%$) и подвижного калия 20 мг/100 г показатель потенциальной буферной способности по отношению к калию (PBC^K) увеличивался в 2 раза (с 20–24 до 40–45). При таком диапазоне достигалась относительная активность калия в пределах 0.002–0.003 М/л.

Наибольшая величина потенциальной буферной способности к фосфору достигалась при содержании гумуса и равновесного фосфора в почве $> 2.5\%$ и 0.11 мг/л соответственно. Изменение показателя PBC^P в отмеченных условиях было обусловлено увеличением десорбционной способности до 1.9 мг/100 г. При содержании гумуса $< 2.5\%$, равновесного фосфора > 0.11 мг/л десорбция фосфора составила 1.5 мг/100 г. Аналогичная закономерность установлена и для содержания гумуса $> 2.5\%$ и $pH_{KCl} > 4.5$. Поэтому повышение содержания в почве органического вещества, фосфора, снижение кислотности способствовало улучшению буферных свойств агросерой почвы.

В итоге разработана ориентировочная, ранжированная на 3 уровня модель устойчивости агросерой тяжелосуглинистой почвы: низкий, средний и высокий уровни. Если общая емкость буферности к кислоте находилась в диапазоне 9–11 мМ-экв/100 г, то достигался средний уровень устойчивости почвы. При этом поглощенных оснований должно было быть ≥ 20 мг-экв/100 г.

Для достижения среднего уровня устойчивости величина буферной способности агросерой почвы не должна быть меньше (на примере изотерм адсорбции в точке концентрации 10 мМ/л) 2 л/кг для цинка, меди, кадмия и свинца. Превышение величины буферности к тяжелым метал-

лам 2.0–4.0 л/кг означало переход на высокий уровень устойчивости.

При активности калия < 2 М/л $\times 10^{-3}$ ($PBC^K < 24$), 2–4 М/л $\times 10^{-3}$ ($45 > PBC^K > 24$) и > 4 М/л $\times 10^{-3}$ ($PBC^K < 24$) достигались соответственно низкий, средний и высокий уровни устойчивости агросерой почвы.

Средний уровень устойчивости обеспечивался при содержании равновесного фосфора от 0.1 до 0.2 мг/л, емкость десорбции фосфора – от 0.7 до 1.4 мг $P_2O_5/100$ г и PBC^P – от 34 до 45 мл/г; высокий уровень устойчивости – при равновесной концентрации фосфора > 0.2 мг/л, емкости десорбции > 1.4 мг $P_2O_5/100$ г и $PBC^P > 45$ мл/г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кудяров В.Н., Соколов М.С., Глинушкин А.П. Современное состояние почв агроценозов России, меры по их оздоровлению и рациональному использованию // *Агрохимия*. 2017. № 6. С. 3–11.
2. Сычев В.Г., Лунев М.И., Павлихина А.В. Современное состояние и динамика плодородия пахотных почв России // *Плодородие*. 2012. № 4(66). С. 5–7.
3. Сычев В.Г., Шафран С.А. О балансе питательных веществ в земледелии России // *Плодородие*. 2017. № 1 (94). С. 1–4.
4. Чекмарев П.А., Лукин С.В. Мониторинг плодородия пахотных почв Центрально-Черноземных областей России // *Агрохимия*. 2013. № 4. С. 11–22.
5. Фрид А.С. Методология оценки устойчивости почв к деградации // *Почвоведение*. 1999. № 3. С. 399–404.
6. Водяницкий Ю.Н., Яковлев А.С. Оценка почвы по содержанию тяжелых металлов в профиле // *Почвоведение*. 2011. № 3. С. 329–335.
7. Фрид А.С., Гребенников А.М. Деградация почв по плодородию // Сб. “Научные основы предотвращения деградации почв (земель) сельскохозяйственных угодий России и формирования систем воспроизводства их плодородия в адаптивно-ландшафтном земледелии” / Под ред. Иванова А.Л. М., С. 291–303.
8. Хитров Н.Б. Представление об устойчивости почв к внешним воздействиям // Тез. докл. Всерос. конф. “Устойчивость почв к естественным и антропогенным воздействиям”. М., 2002. С. 3–7.
9. Анянueva Н.Д. Микробиологические аспекты самоочищения и устойчивости почв. М.: Наука, 2003. 223 с.
10. Державин Л.М., Фрид А.С. О комплексной оценке плодородия пахотных земель // *Агрохимия*. 2002. № 8. С. 5–13.
11. Никитишен В.И. Плодородие почвы и устойчивость функционирования агроэкосистемы. М.: Наука, 2002. 258 с.
12. Черников В.А., Милащенко Н.З., Соколов О.А. Экологическая безопасность и устойчивое развитие // Устойчивость почв к антропогенному воздействию. Пушкино: ОНТИ ПНЦ РАН, 2001. Кн. 3. 203 с.

13. *Чижикова Н.П.* Изменение минералогического состава тонких фракций почв под влиянием агротехногенеза // Почвоведение. 2002. № 7. С. 867–875.
14. *Ильина Л.В.* Комплексное воспроизводство плодородия серых лесных почв и его эффективность. Рязань: Узоречье, 1997. 231 с.
15. *Костин Я.В.* Динамика изменения плодородия и продуктивности серых лесных почв при длительном применении разных форм минеральных удобрений: Дис. ... д-ра с.-х. наук. Рязань, 2001. 260 с.
16. Практикум по агрохимии: Уч. пособ. 2-е изд., перераб. и доп. / Под ред. Минеева В.Г. М.: Изд-во МГУ, 2001. 689 с.
17. *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.
18. *Соколова Т.А., Мотузова Г.В., Малинина М.С., Обуховская Т.Д.* Химические основы буферности почв. М.: Изд-во МГУ, 1991. 108 с.
19. *Доспехов Б.А.* Методика полевого опыта М.: Колос, 1979. 416 с.
20. *Ивойлов А.В.* Анализ данных агрономических исследований методами непараметрической статистики: Уч. пособ. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2000. 68 с.
21. *Лукин С.М.* Калийное состояние дерново-подзолистой супесчаной почвы и баланс калия при длительном применении удобрений // Агрохимия. 2012. № 12. С. 5–14.
22. *Минеев В.Г., Гомонова Н.Ф., Морачевская Е.В.* Изменение свойств и калийного состояния дерново-подзолистой среднесуглинистой почвы при 40-летнем применении агрохимических средств // Агрохимия. 2013. № 10. С. 3–12.
23. *Никитина Л.В.* Влияние длительного применения удобрений в зернопропашном севообороте на калийный режим дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почвы // Агрохимия. 2012. № 12. С. 15–23.
24. *Никитина Л.В.* Исследования калийного режима разных типов почв в длительных опытах Геосети // Агрохимия. 2018. № 1. С. 39–51.
25. *Травникова Л.С., Шаймухаметов М.Ш.* Продукты органо-минерального взаимодействия и устойчивость почв к деградации // Современные проблемы почвоведения. Науч. тр. Почв. ин-та. М., 2003. С. 356–368.

Some Parametres of Stability of Agrogray Soil

R. N. Ushakov^{a,*}, V. I. Levin^a, A. V. Ruchkina^a, and N. A. Golovina^a

^a Ryazan State Agrotechnological University named after P.A. Kostychev
ul. Kostycheva 1, Ryazan 391044, Russia

^{*}E-mail: r.ushakov1971@mail.ru

The potential buffering capacity in gray heavy loamy soil in relation to potassium – PBC^K , phosphorus – PBC^P , heavy metals – PBC^{HM} , the buffering volume to acidification – EBk (buffering properties) was determined. The scientific novelty of the work was in that the wider variation of soil properties and their different combinations in one type of gray soil make possible a more detailed understanding of the correlation of buffering properties and their components from basic agrochemical properties. The aim of the investigation was determining dependence of gray soil buffering properties on agrochemical properties – acidity, humus, phosphorus and potassium supply to develop the agrochemical model of gray soil stability. The soil properties variation has let us determine correlation-regression links, calculate probability equations. The potential potassium buffering by Beckett's, buffering capacity to acidification by the potentiometer method was determined. Soil stability to contamination was estimated for parameters of ion-exchange adsorption of heavy metals – the maximum adsorption and buffer capacity in the field of low initial concentrations by a cation of heavy metals (zinc) from 0 to 0.31 mM/l with 1 : 20 soil-solution ratio and from 0 to 50 mM/l with 1 : 10 soil-solution ratio in the field of high concentrations. The tangent intersection points were found when equilibrium concentration of heavy metal cations equal to 5, 10 and 20 mM/l. It was determined that the low level of agrogray soil stability was in a case of potassium relative activity (AR_0) less than $2 M/l \times 10^{-3}$, PBC^K was less than 24 u. The middle level is when AR_0 equal to $M/l \times 10^{-3}$, PBC^K was not less than 45 u. and the high level was when AR_0 was more than $M/l \times 10^{-3}$ and PBC^K was more than 45 u. When equilibrium concentration of phosphorus (P_{equil} in extract 0.01 M $CaCl_2$), desorption volume (Q_0) and potential buffering capacity was less than 0.1 mg/l, 0.7 mg $P_2O_5/100$ g and 34 ml/g correspondingly the degree of agrogray soil stability was low. The middle level of stability was in a case when P_{equil} was from 0.1 to 0.2 mg/l, Q_0 was from 0.7 to 1.4 mg $P_2O_5/100$ g and PBC^P was from 34 to 45 ml/g. The high stability level was when P_{equil} was more than 0.2 mg/l, Q_0 was more than 1.4 mg $P_2O_5/100$ g and PBC^P was more than 45 ml/g. In order to achieve an average level of stability, the buffer value of the agro-gray soil should not be lower than 2.0 l/kg for zinc, copper, cadmium and lead (according to the adsorption isotherm at the concentration point of 10 mM/l). Exceeding the buffering value to HM 2.0–4.0 l/kg means transition to a high level of stability.

Key words: soil stability parameters, agricultural soil.