

На правах рукописи

Головина Наталья Александровна

**СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ В МОДЕЛИРОВАНИИ ПЛОДОРОДИЯ
АГРОСЕРОЙ ПОЧВЫ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЕЕ УСТОЙЧИВОСТИ К
НЕБЛАГОПРИЯТНЫМ ВОЗДЕЙСТВИЯМ В УСЛОВИЯХ ЮГА
НЕЧЕРНОЗЕМНОЙ ЗОНЫ РФ**

Специальность: 06.01.04 – агрохимия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата биологических наук

Москва – 2018

Диссертационная работа выполнена на кафедре лесного дела, агрохимии и экологии ФГБОУ ВО «Рязанский государственный агротехнологический университет имени П.А. Костычева»

Научный руководитель: доктор сельскохозяйственных наук, профессор
Ушаков Роман Николаевич

Официальные оппоненты: **Савич Виталий Игоревич,**
доктор сельскохозяйственных наук, профессор, ФГБОУ ВО «РГАУ-МСХА имени К.А.Тимирязева», кафедра почвоведения, геологии и ландшафтоведения, профессор
Ефремова Сания Юнусовна,
доктор биологических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Пензенский государственный технологический университет», кафедра биотехнологии и техносферной безопасности, профессор

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ульяновский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина»

Защита состоится «___» _____ 2018 года в 14⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 006.020.01 при Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии имени Д.Н. Прянишникова» по адресу: 127550, Москва, ул. Прянишникова, 31а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке при ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии имени Д.Н. Прянишникова» на сайте: <http://www.vniia-pr.ru/diss/diss-golovina-18-09-2018.pdf>

Автореферат разослан «___» _____ 2018 года

Приглашаем Вас принять участие в обсуждении диссертации на заседании диссертационного совета. Отзывы на автореферат в 2-х экземплярах, заверенных гербовой печатью учреждения, просим направлять по адресу: 127550, Москва, ул. Прянишникова, 31а, ученому секретарю диссертационного совета, E-mail: dissovet_vniia@mail.ru.

**Ученый секретарь
диссертационного совета**

Никитина Любовь Васильевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. 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.

Проблема устойчивости, здоровья почв широко обсуждается в научной литературе (Василевская, 1994; Макаров и др., 1995; Фокин, 1995; Черников и др., 2001; Державин и др., 2002; Миркин, 2002; Никитишен, 2002; Хитров, 2002; Чижикова, 2002; Ананьева, 2003; Глазовский, 2002; Кудеяров, 2006.; Degens и др., 2003). В данных работах указывается актуальность проблемы, приводится обоснование понятия устойчивости почвы, различные аспекты ее оценки. В последнее время введено понятие «здоровье почвы» (Семенов и др., 2016; Кудеяров и др., 2017). Современное агрохимическое состояние агропочв вызывает опасение (Сычев и др., 2012, 2017). По этой причине устойчивость отечественной агросферы в 3,5 раза ниже, чем в развитых странах (Иванов, 2004).

В 2002 году прошла Всероссийская конференция, посвященная проблеме устойчивости почв к естественным и антропогенным воздействиям. Рассмотренные на ней проблемы (методы, индикаторы оценки, механизмы и факторы устойчивости почв к внешним воздействиям и т.д.) остаются актуальными и по сей день.

В узком смысле под устойчивостью почвы как средства производства следует понимать ее способность выполнять одновременно производственную, средообразующую и ресурсовоспроизводящую функции на приемлемом эколого-экономическом уровне в условиях кратковременных и долговременных неблагоприятных антропогенных и природных воздействий. Антропогенные воздействия, приводящие к истощению почвенных ресурсов, подкислению, загрязнению следует расценивать как неблагоприятные. К сожалению, в последнее время указанные процессы в большинстве агропочв усиливаются. В центральном округе Российской Федерации более половины пахотных почв имеют кислую реакцию среды (например, в Рязанской области около 73 %). В Рязанской области, как и в некоторых других областях Нечерноземной зоны свыше 30 % пахотных почв имеют низкую обеспеченность подвижным калием и фосфором. Это создает предпосылки для снижения потенциала устойчивости почв, следовательно, повышения экологической уязвимости сельскохозяйственных растений к внешним воздействиям.

Структурной основой устойчивости почвы являются вещества минеральной и органической природы, входящие в состав почвенно-поглощающего комплекса. Наиболее полно его функциональное состояние отражают физико-химические свойства – показатели буферности (калийная, фосфатная, к подкислению и загрязнению). Это обусловлено тем, что критерием устойчивости почвы является ее способность к формированию

резервов вещества и энергии, снижению активности вредных веществ (тяжелых металлов) или качество процессов, происходящих на границе почвенных фаз. Улучшение активности почвенно-поглощающего комплекса позволит минимизировать внешние экологические риски.

Одновременно с момента организации Рязанского СХИ (1949 г.), впоследствии переименованного в Рязанского ГАТУ, на базе кафедр стали активно закладываться многолетние полевые стационарные опыты с удобрениями, обработками почвы. За длительный период времени определены агрохимические, агрофизические и другие параметры плодородия, систематизированные в форме модели, для управления продукционным процессом на экономически оправданном уровне. Установлены оптимальные для агросерых почв южного Нечерноземья формы азотных, фосфорных и калийных удобрений (Фадькин Г.Н., 1998; Костин Я.В., 2000). За более чем 50-ти летнее время воздействия на агросерую почву сложилась и в дальнейшем только усилилась пространственная неоднородность почвенных свойств по делянкам. Это позволило сформулировать новые цели и задачи.

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 (Ильина, 1997). В качестве дополнений к существующим моделям предлагается физико-химический блок, отражающий устойчивость почв.

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

Достижение цели осуществлялось путем решения задач:

1. Определить устойчивость агросерой почвы к подкислению, загрязнение тяжелыми металлами (цинком, медью, кадмием и свинцом).
2. Оценить калийный и фосфатный режим агросерой почвы.
3. Разработать оптимальный физико-химический блок модели плодородия агросерой почвы, характеризующий устойчивость почвы.

Научная новизна. Впервые на базе многолетних стационарных опытов с минеральными удобрениями и комплексным окультуриванием агросерой почвы изучены вопросы устойчивости агросерой почвы к подкислению, загрязнению тяжелыми металлами, истощению фосфором и калием. Для этого определены емкость буферности к подкислению, буферная способность почвы к загрязнению цинком, медью, кадмием и свинцом, потенциальная буферная способность по отношению к калию и фосфору. Методами математического анализа установлено влияние кислотности почвы, гумуса, обеспеченности почвы калием и фосфором на формирование потенциальной буферной способности. Для улучшения фосфатного и калийного режима агросерой тяжелосуглинистой почвы установлены дозы фосфорных и калийных удобрений.

Результаты исследований использованы в реализации современных подходов к моделированию плодородия агросерой тяжелосуглинистой почвы, которые позволят по-новому взглянуть на проблему устойчивости почвы к неблагоприятным воздействиям.

Практическая значимость работы. В дополнение к имеющимся показателям плодородия предложены физико-химические показатели устойчивости агросерой почвы. Они позволяют оценить степень устойчивости почвы, разработать мероприятия с учетом текущих и прогнозируемых состояний плодородия.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Устойчивость агросерой почвы к подкислению, загрязнению цинком, медью, кадмием и свинцом в многолетних полевых опытах с минеральными и органическими удобрениями.

2. Агрохимические условия оптимального проявления устойчивости агросерой почвы на основе калийной и фосфатной буферности.

3. Модель устойчивости агросерой почвы к подкислению, истощению калием и фосфором, тяжелым металлам – цинку, меди, кадмию и свинцу.

Достоверность результатов исследований подтверждается данными многолетних полевых исследований и лабораторных анализов, выполненных по общепринятым методикам и подвергнутых математической обработке методами дисперсионного, корреляционного, регрессионного статистического анализа.

Апробация работы. Основные результаты исследований представлены на VIII Международной научно-практической конференции «Аграрная наука – сельскому хозяйству» (г. Барнаул, 6 – 7 февраля 2013 г.); Международной научно-практической конференции «Проблемы формирования комплексов машин и оборудования для агрохимического обеспечения производства сельскохозяйственной продукции» (г. Рязань, 15 декабря 2014 г.); 66-й Международной научно-практической конференции, посвященной 170-летию со дня рождения профессора Павла Андреевича Костычева «Аграрная наука как основа продовольственной безопасности региона» (г. Рязань, 14 мая 2015 г.); Международной научно-практической конференции «Научное обеспечение развития АПК в условиях импортозамещения» (г. Санкт-Петербург – Пушкин, 28 – 30 января 2016 г.). Национальной научно-практической конференции «Инновационное развитие современного агропромышленного комплекса России» (г. Рязань, 12 декабря 2016 г.); Всероссийской научно-практической конференции с Международным участием «Фундаментальные и прикладные основы сохранения плодородия почвы и получения экологически безопасной продукции растениеводства», посвященной 75-летию со дня рождения доктора сельскохозяйственных наук, профессора Куликовой А.Х. (г. Ульяновск, 21 – 22 ноября 2017 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 15 печатных работ, в том числе 7 статей в изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

Объем и структура диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, 6 глав, выводов и приложений. Она включает 18 таблиц,

иллюстрирована 13 рисунками, содержит 13 приложений. Список цитируемой литературы состоит из 227 наименований, в том числе 24 – зарубежных авторов.

Благодарности. Автор выражает глубокую благодарность научному руководителю д.с.-х.н., профессору Р.Н. Ушакову, а также д.с.-х.н., профессору Л.В. Ильиной, д.с.-х.н., профессору Я.В. Костину, доцентам Г.Н. Фадькину, С.А. Пчелинцевой и В.И. Гусеву за предоставленную возможность использовать опытные поля в качестве научного полигона для изучения проблемы устойчивости агросерой почвы. Выражаю признательность А.Н. Зубцу за предоставления первичных материалов по кислотности агросерой почвы с использованием их в разработке модели устойчивости.

ОБЪЕКТЫ, УСЛОВИЯ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Полигоном для наших исследований послужили полевые многолетние стационарные опыты агротехнологической опытной станции Рязанского ГАТУ по изучению комплексного окультуривания агросерой тяжелосуглинистой почвы (опыт 1 – органоминеральная система удобрений, **ОМСУ**), влияния разных форм азотных удобрений (опыт 2), фосфорных (опыт 3) и калийных удобрений (опыт 4), а также полевой опыт по интенсивному окультуриванию агросерой почвы. В опытах 2, 3 и 4 практиковалась минеральная система удобрений (**МСУ**). Опыты были заложены более 40 лет назад Л.В. Ильиной, Е.А. Жориковым, Т.К. Никушиной, Н.И. Красеньковой. В указанных опытах испытывали разные формы, дозы минеральных удобрений, изучали их влияние на основные агрохимические показатели почвы, урожайность сельскохозяйственных растений. За длительное время проведения опытов сложилась определенная пространственная вариабельность агрохимических и физико-химических свойств, которую мы впервые использовали для разработки модели устойчивости плодородия агросерой тяжелосуглинистой почвы.

Для изучения органической системы удобрений (**ОСУ**) Р.Н. Ушаковым был заложен полевой опыт по интенсивному окультуриванию агросерой почвы (опыт 5). Схема опыта включала два варианта: без удобрений – контроль (неокультуренная почва или неплодородная почва) и с навозом (окультуренная почва или плодородная почва). Для этого в течение пяти лет в агросерую почву ежегодно вносили подстилочный навоз КРС из расчета 40 т/га. Контрольный вариант представляла почва, в которую за последние 10 лет удобрения не вносили. Опыт заложен в 3–х кратной повторности методом рендомизации. Размер делянок 300 м².

Для изучения влияния плодородия агросерой почвы на устойчивость к подкислению использованы почвенные образцы опыта 5 для прогнозирования изменения ЕБк. Для этого провели модельное подкисление почвы разбавленной соляной кислотой, изменив начальную точку титрования. Кислотная нагрузка составила $4,7 \cdot 10^{-6}$ М/100 г (рН₁), 11 (рН₂) и

$30 \cdot 10^{-6}$ М/100 г. (pH_3), что эквивалентно 5,33; 4,96 и 4,52 рН. Контроль – фоновая кислотность (pH_0) (лабораторный опыт 5.1).

В исследованиях буферности к рН кроме контроля вариантами были: на фосфорно-калийном фоне хлористый аммоний (фон РК+Nх); кальциевая селитра (фон РК+Nскц), на азотно-калийном фоне – суперфосфат двойной (фон НК+Рсд). В исследованиях буферности к загрязнению выбрали комплекс минеральных удобрений, включающий аммиачную селитру, калийную соль и суперфосфат двойной. Данные удобрения использованы в опытах по изучению потенциальной буферной способности к фосфору (**РВС^Р**) и к калию (**РВС^К**).

Общие агрохимические свойства агросерой почвы показаны в таблице 1.

Полевые опыты находятся в пределах одной геохимической фации (элювиальной), отобранные с них почвенные образцы не отличались по гранулометрическому составу. Поэтому на показатели буферности влияли гумус, обменная кислотность почвы ($pH_{обм}$), обеспеченность ее элементами питания. Для установления математических зависимостей была проведена соответствующая выборка почвенных образцов. Их общее количество составило 25 для **РВС^Р** и **РВС^К** и 18 – **ЕБк**.

Таблица 1. Агрохимические свойства агросерой почвы в опытах (0-20 см)

| Система удобрения | Гумус, % | P_2O_5 подв, | K_2O подв, | $pH_{обм}$ | H_g | $Ca^{2+}+Mg^{2+}$ |
|--|-----------|----------------|--------------|------------|--------------|-------------------|
| | | мг/100 г | | | мг-экв/100 г | |
| система удобрения | | | | | | |
| Опыт 1 | | | | | | |
| Без удобрений (контроль 1) Органо-минеральная | 2,1 ± 0,2 | 12,3 ± 0,9 | 14,4 ± 0,9 | 5,7 ± 0,1 | 2,6 ± 0,1 | 24,1 ± 0,3 |
| | 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 |
| Минеральная | 2,3 ± 0,2 | 25,7 ± 0,4 | 23,1 ± 0,5 | 5,0 ± 0,2 | 4,7 ± 0,1 | 18,9 ± 0,5 |
| Опыт 5 | | | | | | |
| Без удобрений (контроль 3) | 2,0 ± 0,3 | 11,0 ± 2,2 | 7,0 ± 1,0 | 5,5 ± 0,1 | 3,1 ± 0,1 | 23,0 ± 0,7 |
| Органическая | 5,4 ± 0,7 | 46,6 ± 1,0 | 40,7 ± 2,3 | 6,0 ± 0,3 | 1,3 ± 0,1 | 46,3 ± 0,6 |

Лабораторные анализы осуществляли общепринятыми методами и соответствующими ГОСТами. В почвенных образцах определяли обменную кислотность pH_{KCl} – потенциометрическим методом (ГОСТ 26483-85), гидролитическую кислотность – по методу Каппена в модификации ЦИНАО (ГОСТ 26212-91), актуальную кислотность – по методике, описанной в практикуме [16], сумму поглощённых оснований – по методу Каппена–Гильковица в модификации ЦИНАО (ГОСТ 27821-88), гумус – по Тюрину в модификации ЦИНАО (ГОСТ 26213-91), подвижные P_2O_5 и K_2O – по Чирикову в модификации ЦИНАО (ГОСТ 26204-91), легко подвижный калий ($K_2O_{легк}$) – извлечением калия вытяжкой 0,02 М $CaCl_2$ (ОСТ 10-271-2000).

Потенциальную буферность способность по отношению к калию (линейную) определяли по Beckett (1964). 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 $\pm\Delta K$ и AR. $\pm\Delta K$ представляет собой количество подвижного калия, которое почва отдает ($-\Delta K$) или поглощает ($+\Delta K$) к моменту установления равновесия между калием почвы и калием раствора. Изотерму сорбции, представляющую собой линию, прямую в верхней части и изогнутую в нижней, строили в координатах ΔK и AR₀. Пересечение ее с осью абсцисс дает величину относительной активности калия AR₀, соответствующую отношению активностей калия и кальция в растворе CaCl₂ – KCl, при котором почва не поглощает и не отдает калий. Легкоподвижный калий (K₂O_{легк}) определяли извлечением калия вытяжкой 0,02 М CaCl₂. Термодинамическая оценка фосфатного состояния почв проведена с использованием метода изотерм сорбции фосфатов: равновесная концентрация фосфора (P_{равн}) по Beckwith (1965), потенциальную буферную способность почв по отношению к фосфору – по Beckett (1964), с определением десорбционной емкости (Q₀), максимальную буферную способность (MBC), буферную способность (BC) при заданной P_{равн} 2 мг/л в растворе – по Keramidis и др. (1983) на изотермах Q/Y и Ленгмюра.

Фактор интенсивности фосфатов определяли по методу Карпинского и Замятиной в вытяжке 0,015 М K₂SO₄ при соотношении почвы к раствору 1 : 5. При определении фосфатной буферности использовали вытяжку 0,01 М CaCl₂ (P_{равн}).

Исследование ионообменной адсорбции катионов меди, цинка, кадмия и свинца проводили в статических условиях. Буферность к тяжелым металлам (ПБСTM) определяли по методу Т.А. Соколовой и др. (1991).

Устойчивость почвы к загрязнению оценивали по параметрам ионообменной адсорбции тяжелых металлов (ТМ) – максимальной адсорбции и буферной способности в области низких исходных концентраций ТМ – от 0 до 0,31 мМ/л при соотношении почв: раствор, равном 1:20 (Соколова и др., 1991; Водяницкий и др., 1998), и в области высоких концентраций – от 0 до 50 мМ/л при соотношении почв: раствор, равном 1:10 (Ладонин, 1997). Находили точки пересечения касательной, проведенной при равновесной концентрации катионов ТМ 5, 10 и 20 мМ/л. В этом случае буферная способность определяется как тангенс угла наклона (тангенсная буферность, Beckett, 1971).

Потенциальную буферную способность (ПБС) рассчитывали по формуле:

$$\text{ПБС} = Q_{\max} \cdot K / (1 + C_{\text{равн}} \cdot K) \cdot (1 + C_0 \cdot K);$$

где Q_{max} – максимальная адсорбция катиона ТМ (мМ/кг); C₀ – концентрация ТМ (мМ/л) при нулевой исходной концентрации; C_{равн} – равновесная концентрация (мМ/л).

Для нахождения величин максимальной адсорбции калия, фосфора и **ТМ** использовали уравнение Ленгмюра и Дубинина–Радускевича (Водяницкий и др., 1998).

Для определения **ЕБк** использовался метод непрерывного потенциометрического титрования (НПТ) (Соколова, 2001). Величину **ЕБк** рассчитывали по количеству титранта, необходимого для изменения рН на заданную величину.

Общее валовое содержание элементов в почве определяли на рентгенофлуоресцентном анализаторе Tefa-6111.

Для статистической обработки экспериментальных данных методами дисперсионного, корреляционного, регрессионного и других видов статистического анализа (Дмитриев, 1995; Доспехов, 1979; Ивойлов, 2000) с использованием программного комплекса «STATISTICA».

Символы «<», «>» и «∩» означают математические знаки «меньше», «больше» и одновременность событий соответственно; p – уровень значимости, P – вероятность в %, r – коэффициент корреляции.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Устойчивость почвы к подкислению

К настоящему времени в Рязанской области средневзвешенное значение рН пахотных почв составляет 5,3. На долю кислых почв приходится около 73 %, из них сильнокислых почв – 4 %, среднекислых – 26 %, слабокислых – 42 %. В некоторых районах с выщелоченными и оподзоленными черноземами доля почв с рН ниже 5,5 ед. доходит до 80 – 90 %. Средневзвешенное значение рН под сенокосами еще ниже – 4,7 ед. Установлена зависимость **ЕБк** от содержания поглощенных оснований – $Y = 7,7 + 3,6X$ ($r = 0,77$), обменной кислотности ($pH_{обм}$) – $Y = -122,5 + 39,3X$ ($r = 0,89$), актуальной кислотности ($pH_{вод}$) – $Y = -170,4 + 39,5X$ ($r = 0,90$), гидролитической кислотности – $Y = 134,4 - 12,4X$ ($r = -0,85$).

На контроле содержание гумуса составило 2,1-2,2 %, $pH_{ксл}$ – 5,5-5,7, **ЕБк** – 7,6 мМ-экв/100 г. При подкислении агросерой почвы до 4,4 (длительное внесение хлористого аммония) значение **ЕБк** снизилось в 1,8 раза – до 4,2 мМ-экв/100 г. С увеличением содержания гумуса в почве до 3,0 % при $pH_{ксл}$ 5,9 (опыт 1 с органоминеральной системой удобрения), **ЕБк** улучшилась и составила 10,8 мМ-экв/100 г. При дальнейшем увеличении гумуса до 5,4% (опыт 5) ожидается формирование **ЕБк** на уровне 46,3 мМ-экв/100 г. (различия в сравнении с контрольным вариантом были достоверными при $p < 0,05$).

В опыте 5 кислотная нагрузка составила $4,7 \cdot 10^{-6}$ М/100 г (pH_1), $11 \cdot 10^{-6}$ М/100 г (pH_2) и $30 \cdot 10^{-6}$ М/100 г. (pH_3), что эквивалентно 5,33; 4,96 и 4,52 рН. Контроль – фоновая кислотность (pH_0). В неокультуренной и окультуренной почвах, несмотря на близкие для них значения НПТ (рН 7,3 – 7,4), показатель общей буферности к подкислению между вариантами различался на 30 мМ-экв/кг. Более высокие интервальные

значения буферности свидетельствуют 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 соответственно 57, 45 и 48 мМ-экв/кг, плодородной – 175; 165 и 155 мМ-экв/кг.

Агрохимический аспект устойчивости

К настоящему времени созданы условия для истощения почв. Среднее значение подвижного фосфора в пахотных почвах Рязанской области составляет около 11,0 мг/100 г почвы с наибольшими величинами (больше 10 мг/100 г) в дерново-подзолистых и светлых серых лесных почвах. В черноземах выщелоченных и оподзоленных содержание фосфора в большинстве случаев не превышает 10 мг/100г. На долю почв со средним содержанием фосфора приходится 36 %, повышенным – 18 %. Каждое пятое поле с очень низким и низким содержанием фосфора.

Средневзвешенное содержание подвижного калия в пахотных почвах области варьирует от 8 до 14 мг/100 г. На долю почв с I и II классами обеспеченности приходится 28 %, III класс – 32 %.

Поэтому целесообразным будет показать зависимость калийной и фосфатной буферности от основных агрохимических свойств.

Калийная и фосфатная буферность, как процессные 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.

От гумуса (в уравнении X) зависит относительная активность калия, при котором почва не поглощает и не отдает калия (AR_0). Уравнение регрессии имеет вид: $Y = -0,0098 + 0,0046X$. Предлагается для средней и высокой степени устойчивости функционирования агросерых суглинистых почв доведение значения AR_0 соответственно до 2 – 4 и 4 – 7 · 10⁻³ М/л^{0,5} (Травникова, 2003 и др.). 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_0 от $K_2O_{\text{подв}}$ 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 (при P = 100 %) значение AR_0 составит 1,7·10⁻³ М/л^{0,5}, что соответствует низкой степени устойчивости; если гумуса больше 2,5 %, то AR_0 превысит 10·10⁻³ М/л^{0,5}; значения –ΔК (десорбционная ветвь) и +ΔК (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. 2).

Таблица 2. Уравнения для прогноза калийного состояния агросерой почвы

| Условие | $AR_o, M/л^{0,5}$ | $-ΔK_o,$ мг-экв/100 г | $+ΔK_o,$ мг-экв/100 г |
|---|----------------------|--------------------------|--------------------------|
| | в уравнениях X | | |
| если гумуса, % меньше 2 | $Y = -1,15 + 1295X$ | $Y = -2,70 + 60,8X$ | $Y = -5,8 + 0,30X$ |
| больше 2 | $Y = -0,25 + 92,9X$ | $Y = -0,23 + 13,6X$ | $Y = 4,3 + 0,34X$ |
| если $K_2O_{подв},$ мг/100 г меньше 10 | $Y = -0,63 + 2185X$ | не установлено | $Y = -8,22 + 0,62X$ |
| от 10 до 20 | $Y = -0,89 + 1319X$ | $Y = -0,70 + 54,2X$ | $Y = -3,07 + 0,23X$ |
| больше 20 | $Y = -0,40 + 85X$ | $Y = -0,90 + 11,4X$ | $Y = -3,47 + 0,21X$ |
| меньше 10, гумуса меньше 2,5 % | $Y = -1,04 + 11020X$ | не установлено | $Y = -9,39 + 0,75X$ |
| от 10 до 20, гумуса меньше 2,5 % | $Y = -1,03 + 1189X$ | $Y = -1,08 + 55X$ | $Y = -2,60 + 0,19X$ |
| больше 20, гумуса меньше 2,5 % | $Y = -5,59 + 3679X$ | $Y = -56,5 + 104,7X$ | $Y = -3,40 + 0,20X$ |
| меньше 10, гумуса больше 2,5 % | $Y = -1,03 + 1769X$ | не установлено | $Y = -41,3 + 2,83X$ |
| от 10 до 20, гумуса больше 2,5 % | $Y = -1,10 + 3560X$ | $Y = -0,24 + 115,6X$ | $Y = -6,74 + 0,54X$ |
| больше 20, гумуса больше 2,5% | $Y = -0,69 + 62,9X$ | $Y = -1,05 + 8,09X$ | не установлено |
| если гумуса, % меньше 2,5, pH_{KCl} меньше 4,5 | $Y = -3,40 + 2510X$ | $Y = -2,82 + 55,4X$ | $Y = -20,1 + 1,05X$ |
| меньше 2,5, pH_{KCl} больше 4,5 | $Y = -0,93 + 1192X$ | $Y = -0,77 + 43,2X$ | $Y = -2,9 + 0,22X$ |

Примечание: Y – задаваемая вероятность (P, в %); X – вероятные значения параметров калийной буферности

При содержании $K_2O_{\text{подв.}}$ менее 10 мг/100 г и от 10 до 20 мг/100 г почвы степень устойчивости низкая, так как по нашим расчетам AR_0 не будет превышать $2,0 \cdot 10^{-3} \text{ М/л}^{0,5}$. Если $K_2O_{\text{подв.}}$ больше 20 мг/100 г, то можно достичь высокой степени устойчивости почвы по AR_0 , значение которой превышает $7 \cdot 10^{-3} \text{ М/л}^{0,5}$. При различных комбинациях $K_2O_{\text{подв.}}$ и гумуса получена следующая закономерность: максимальное повышение AR_0 до $16,5 \cdot 10^{-3} \text{ М/л}^{0,5}$ при увеличении гумуса ($> 2,5 \%$) отмечалось только на фоне обеспеченности агросерой почвы $K_2O_{\text{подв.}}$ не ниже средней.

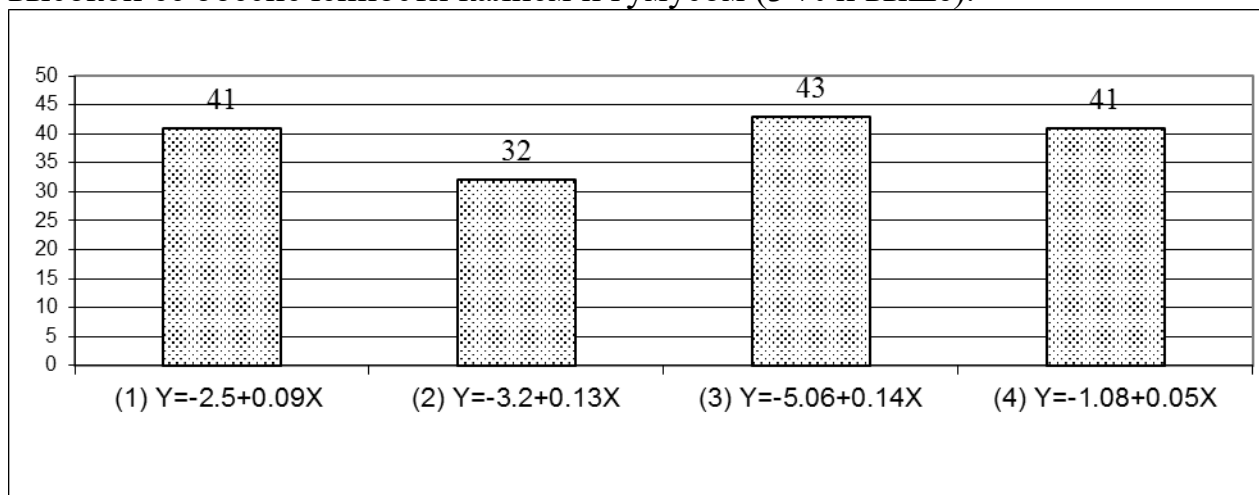
Вероятностные значения AR_0 в математической обработке, включающей комбинации $K_2O_{\text{подв.}}$ с гумусом менее 2,5 %, ниже по сравнению без гумуса. Сравнение этих значений позволяет оценить участие гумуса в формировании AR_0 . Для диапазона $10 > K_2O > 0$ вклад гумуса составляет 26 %, при $K_2O > 20 \text{ мг/100 г}$ – 12 %.

Уравнением Дубинина–Радущкевича 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. Установлено, что если гумуса $< 2,5 \%$ и $pH_{\text{обм}} < 4,5$, то значение $-\Delta K$ возрастает в 1,8 раза (до 0,07 мг-экв/100 г) по сравнению с $pH_{\text{обм}} > 4,5$. В кислой среде ожидается также увеличение поглощения калия на 2 – 3 мг-экв/100 г ($+\Delta K = 20 \text{ мг-экв/100 г}$).

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 $K_2O_{\text{подв.}}$ в области $pH_{\text{обм}} < 5,0$ колебалось от 8 до 15 мг/100 г, при $pH_{\text{обм}} > 5,0$ – от 19 и выше. В 32 % случаев содержание гумуса более, чем 2,5 %, привело к формированию PBC^k больше 20 ед., однако это возможно только при ниже средней обеспеченности почвы $K_2O_{\text{подв.}}$.

Наибольшее значение PBC^k было установлено в 16 % случаев (рис. 1), когда отмечалось снижение гумуса до 1,7 – 1,9 % и превышение $K_2O_{\text{подв.}}$ величины 20 мг/100 г, хотя последний определяет AR_0 , поэтому PBC^k должна 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 ($K_2O_{\text{подв.}}$ около 10 мг/100 г) следует ожидать формирования низкой буферности ($PBC^k = 32$) при содержании гумуса больше 2,5 %. Аналогичный эффект обнаруживается и при среднекислой реакции среды, но при более высоких значениях $K_2O_{\text{подв.}}$. В первом и втором случаях (в сумме на их долю приходилось 36 %) низкая PBC^k была обусловлена невысокой десорбционной способностью ($-\Delta K$ около 0) и незначительной относительной активностью калия ($AR_0 < 1,0 \cdot 10^{-3} \text{ М/л}^{0,5}$). 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 (меньше 2,5 %), т.е. дегумификацией илистых фракций, о чем свидетельствуют высокие значения $+\Delta K = 18 - 20 \text{ мг-экв/100 г}$. Такое же

значение $\text{РБС}^{\text{К}}$ (41 единиц) для агросерой почвы можно сформировать при высокой ее обеспеченности калием и гумусом (3 % и выше).



Примечание: 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

Рис. 1. Потенциальная буферная способность по отношению к калию с вероятностными уравнениями при различных комбинациях содержания гумуса и $\text{K}_2\text{O}_{\text{подв}}$.

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 $\text{K}_2\text{O}_{\text{подв}}$ – 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, $\text{РБС}^{\text{К}} = 22$. Это не самый оптимальный показатель буферности, так как можно в агросерой тяжелосуглинистой почве за счет комплексного ее окультуривания повысить $+\Delta\text{K}$ до 0,09 мг-экв/100 г. При такой сорбционной способности содержание гумуса должно быть 3,9 %, $\text{K}_2\text{O}_{\text{подв}}$ – 26 мг/100 г. Если принять за среднюю степень устойчивости $\text{AR}_0 = 0,002 – 0,003$ М/л, то $\text{РБС}^{\text{К}}$ составит 30 – 45.

Следовательно, устойчивость калийного режима складывается при содержании гумуса в агросерой почве выше 2,5 %, $\text{K}_2\text{O}_{\text{подв}}$ не ниже 17 – 20 мг/100 г и $\text{pH}_{\text{обм}} > 5$. Увеличение содержания гумуса приводит к повышению AR_0 и улучшению функционального состояния ППК. При содержании $\text{K}_2\text{O}_{\text{подв}}$ и $\text{K}_2\text{O}_{\text{легк}}$ в почве соответственно ниже 12 и 1 мг/100 г AR_0 элемента крайне низкая ($0,5 – 0,7 \cdot 10^{-3}$ М/л). При возрастании количества $\text{K}_2\text{O}_{\text{подв}}$ в 2 раза значение AR_0 увеличивается в 7 раз, $-\Delta\text{K}_0$ в 10 раз, $\text{РБС}^{\text{К}}$ в 2,2 раза (табл. 3).

Таблица 3. Влияние содержания калия (мг/100 г) и гумуса (%) на компоненты калийной буферности агросерой почвы

| Условие | $AR_o, 10^{-3} \text{ М/л}$ | $-\Delta K_o,$ мг-экв/100 г | PBC^k |
|---|-----------------------------|--------------------------------|---------|
| если $K_2O_{\text{подв.}}$ меньше 12 | $\leq 0,5 \pm 0,0003$ | $\leq 0,01 \pm 0$ | 20 |
| если $K_2O_{\text{подв.}}$ От 12 до 20 | $3,5 \pm 0,0014$ | $0,1 \pm 0,07$ | 29 |
| если $K_2O_{\text{подв.}}$ От 12 до 20 при гумусе от 2,5 до 3,5 | $4,5 \pm 0,0002$ | $0,20 \pm 0,005$ | 44 |
| если $K_2O_{\text{легк.}}$ меньше 1 | $\leq 0,7 \pm 0,0012$ | $\leq 0,01 \pm 0$ | 14 |
| если $K_2O_{\text{легк.}}$ от 1 до 2 | $1,3 \pm 0,0011$ | $0,04 \pm 0,001$ | 31 |

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 агросерых тяжелосуглинистых почвах, в 36 % случаев имело место одновременное повышение интенсивности фосфора в растворе и PBC^p относительно 25 мг/г. Оптимальные условия для этого были следующими: содержание гумуса в среднем 3,0 %; $pH_{\text{обм}}$ около 5,3 и концентрация $P_{\text{равн}}$ 0,15 мг/л. В 32 % случаев происходило снижение как PBC^p , так и Y_o при условии содержания гумуса ниже 2,5 %, $P_{\text{равн}}$ ниже 0,11 мг/л и возрастания кислотности почвенного раствора до 4,6 $pH_{\text{обм}}$. Установлено, что если содержание $P_{\text{равн}} \leq 0,11$ мг/л, а гумуса $\leq 2,5$ %, то Q_o составит 0,68 мг/100г. Если величины отмеченных выше параметров увеличиваются соответственно до 0,15 мг/л и 3,5 %, то Q_o возрастает до 1,35 мг/100 г, а PBC^p – с 34 до 45 мг/г. Примем значения PBC^p 34 – 45 мг/г, Q_o – 0,6 – 1,3 мг/100 г и концентрации фосфора 0,1 – 0,2 за средний уровень устойчивости агросерой почвы меньшие значения – за низкий уровень.

Устойчивость почвы к загрязнению

В таблицах 4, 5 отражены параметры, характеризующие адсорбцию почвой ТМ. Агросерая почва обладает наибольшей адсорбирующей способности к свинцу, далее к кадмию, цинку и меди. На контроле Q_{max} составила соответственно в порядке указанных элементов 132 мМ/кг (27 мг/кг), 93 мМ/кг (10 мг/кг), 125 мМ/кг (8 мг/кг) и 103 мМ/кг (7 мг/кг); на минеральной системе удобрения – 61 (13), 85 (10), 143 (9) и 102 мМ/кг (6 мг/кг).

В табл. 4 представлены значения PBC^{TM} . При совместном внесении органических и минеральных удобрений при всех равновесных концентрациях катионов ТМ значения PBC^{TM} были больше контрольного и варианта с минеральной системой удобрения. Различные условия опыта оказали неодинаковое влияние на поглощение почвой катионов ТМ.

Таблица 4. Параметры адсорбции агросерой почвы цинка, меди, кадмия и свинца

| Вариант | С исх., мМ | С, мкг/мл | С, мм/л | Q, мм/кг | Q/C | ПБС™ |
|--|---------------|--------------|------------|-------------|--------|------|
| цинк | | | | | | |
| Без удобрений | 1,2 | 1,7 | 0,03 | 11,8 | 392,0 | 11,2 |
| | 5,2 | 80,6 | 1,2 | 39,3 | 32,0 | 10,1 |
| | 10,2 | 282 | 4,3 | 58,5 | 13,5 | 8,1 |
| | 51,3 | 2679 | 40,9 | 103,7 | 2,5 | 2,4 |
| Минеральная система удобрения | 1,2 | 2,0 | 0,03 | 11,7 | 391,0 | 11,4 |
| | 5,2 | 75,3 | 1,2 | 40,1 | 34,8 | 10,5 |
| | 10,2 | 272 | 4,2 | 60,0 | 14,4 | 8,6 |
| | 51,3 | 2613 | 39,9 | 113,8 | 2,8 | 2,7 |
| Продолжение таблицы 4 | | | | | | |
| Вариант | С исх., мМ | С, мкг/мл | С, мм/л | Q, мм/кг | Q/C | ПБС™ |
| Органоминеральная система удобрения | 1,2 | 0,8 | 0,01 | 11,9 | 1192,0 | 13,5 |
| | 5,2 | 75,7 | 1,2 | 40,0 | 34,5 | 11,9 |
| | 10,2 | 255 | 3,9 | 62,6 | 16,0 | 9,5 |
| | 51,3 | 2675 | 40,9 | 104,3 | 2,5 | 2,5 |
| медь | | | | | | |
| Без удобрений | 1,0 | 0,9 | 0,01 | 9,9 | 993,0 | 16,4 |
| | 4,8 | 24,8 | 0,4 | 43,6 | 111,7 | 15,5 |
| | 10,5 | 193 | 3,0 | 62,8 | 20,7 | 11,1 |
| | 47,0 | 2411 | 37,9 | 90,9 | 2,4 | 2,3 |
| Минеральная система удобрения | 1,0 | 0,2 | 0,003 | 10,0 | 2642,1 | 15,3 |
| | 4,8 | 29,0 | 0,5 | 42,9 | 93,3 | 14,3 |
| | 10,5 | 283 | 4,5 | 60,9 | 13,7 | 9,2 |
| | 47,0 | 2421 | 38,1 | 89,4 | 2,3 | 2,3 |
| Органоминеральная система удобрения | 1,0 | 0,3 | 0,004 | 10,0 | 2180,4 | 17,6 |
| | 4,8 | 9,5 | 0,2 | 43,2 | 288,1 | 17,2 |
| | 10,5 | 168 | 2,7 | 66,8 | 25,2 | 12,2 |
| | 47,0 | 2399 | 37,8 | 92,9 | 2,53 | 2,4 |
| кадмий | | | | | | |
| Без удобрений | 1,0 | 3,7 | 0,03 | 9,4 | 312,3 | 11,0 |
| | 5,2 | 178,7 | 1,6 | 36,4 | 22,9 | 9,4 |
| | 7,0 | 310 | 2,8 | 42,2 | 15,3 | 8,4 |
| | 47,6 | 4465 | 39,7 | 79,2 | 2,0 | 1,9 |
| Минеральная система удобрения | 1,0 | 4,2 | 0,04 | 9,3 | 233,0 | 10,9 |
| | 5,2 | 203,4 | 1,8 | 34,2 | 18,9 | 8,9 |
| | 7,0 | 335 | 2,9 | 40,0 | 13,4 | 7,9 |
| | 47,6 | 4529 | 40,3 | 73,5 | 1,8 | 1,8 |
| Органоминеральная система удобрения | 1,0 | 1,7 | 0,02 | 9,6 | 477,5 | 12,6 |
| | 5,2 | 173,4 | 1,5 | 36,9 | 24,0 | 10,3 |
| | 7,0 | 293 | 2,6 | 43,7 | 16,7 | 9,1 |
| | 47,6 | 4508 | 40,1 | 75,4 | 1,9 | 1,8 |
| свинец | | | | | | |
| Без удобрений | | | | | | |

| | | | | | | |
|-------------------------------------|------|------|-------|-------|--------|------|
| | 0,8 | 0,7 | 0,003 | 8,0 | 2503 | 14,5 |
| | 4,4 | 8,9 | 0,04 | 43,1 | 1078,0 | 14,4 |
| | 7,5 | 371 | 1,8 | 56,8 | 31,7 | 12,1 |
| | 42,6 | 6590 | 31,8 | 108,1 | 3,4 | 3,2 |
| Минеральная система удобрения | 0,8 | 0,4 | 0,002 | 8,0 | 4461 | 20,8 |
| | 4,34 | 8,9 | 0,04 | 43,1 | 1077,8 | 20,7 |
| | 7,5 | 459 | 2,2 | 52,5 | 23,8 | 14,0 |
| | 42,6 | 7612 | 36,7 | 58,7 | 1,6 | 2,3 |
| Органоминеральная система удобрения | 0,8 | 0 | 0 | 8,1 | max | 20,9 |
| | 4,4 | 1,4 | 0,01 | 43,5 | 4347,0 | 20,9 |
| | 7,5 | 300 | 1,5 | 60,2 | 41,5 | 15,8 |
| | 42,2 | 7041 | 33,9 | 86,3 | 2,5 | 2,5 |

Таблица 5. Параметры уравнения Ленгмюра и Дубинина–Радушкевича агросерой почвы в зависимости от систем удобрения

| Вариант (система удобрений) | 1/ ($Q_{\max} \cdot K$) | 1/ Q_{\max} | Q_{\max} , мМ/кг | K | - ΔG , кДж/моль | Q_{\max} , мМ/кг | -B | E, кДж/моль | | | | | | |
|-----------------------------|------------------------------|---------------|-----------------------|------|----------------------------|-----------------------|---------|----------------|---------|--|--|--------------------|--|--|
| | | | | | | | | | Ленгмюр | | | Дубинин–Радушкевич | | |
| | | | | | | | | | цинк | | | | | |
| Без удобрений | 0,0846 | 0,0080 | 125 | 0,09 | 11,08 | 63 | 0,0057 | 9,2 | | | | | | |
| Минеральная | 0,0906 | 0,0070 | 143 | 0,08 | 10,58 | 66 | 0,0083 | 7,6 | | | | | | |
| Органо-минеральная | 0,0771 | 0,0081 | 123 | 0,11 | 11,33 | 65 | 0,0035 | 11,7 | | | | | | |
| | медь | | | | | | | | | | | | | |
| Без удобрений | 0,0606 | 0,0097 | 103 | 0,16 | 12,36 | 67 | 0,0023 | 14,5 | | | | | | |
| Минеральная | 0,0670 | 0,0098 | 102 | 0,15 | 12,14 | 64 | 0,0015 | 17,9 | | | | | | |
| Органо-минеральная | 0,0559 | 0,0096 | 104 | 0,17 | 12,53 | 72 | 0,0013 | 19,3 | | | | | | |
| | кадмий | | | | | | | | | | | | | |
| Без удобрений | 0,0868 | 0,0108 | 93 | 0,12 | 11,74 | 50 | 0,0046 | 10,2 | | | | | | |
| Минеральная | 0,0877 | 0,0118 | 85 | 0,13 | 11,94 | 47 | 0,0043 | 10,6 | | | | | | |
| Органо-минеральная | 0,0762 | 0,0117 | 85 | 0,15 | 12,26 | 50 | 0,0022 | 14,8 | | | | | | |
| | свинец | | | | | | | | | | | | | |
| Без удобрений | 0,0712 | 0,0076 | 132 | 0,11 | 11,37 | 81 | 0,0027 | 13,3 | | | | | | |
| Минеральная | 0,0246 | 0,0164 | 61 | 0,37 | 14,83 | 59 | 0,00022 | 40,1 | | | | | | |
| Органо-минеральная | 0,0468 | 0,0105 | 95 | 0,22 | 13,18 | 75 | 0,00033 | 29,3 | | | | | | |

Для всех элементов на изотерме адсорбции их почвой в варианте с органоминеральной системой удобрения можно выделить отрезок (до концентрации 6 – 10 мМ/л в зависимости от элемента) с более высокой степенью поглощения по сравнению с другими вариантами. При нагрузке в 6 – 10 мМ/л разница в поглощении составила около 2 мМ/кг или 0,13 мг/кг. В области высоких концентраций вектор направленности изотерм по отношению к осям координат меняется (за исключением меди).

Ослабления устойчивости агросерой почвы к загрязнению цинком и медью при длительном, комплексном внесении минеральных удобрений не установлено, так как значение Q_{\max} по цинку превышало Q_{\max} в контрольном

варианте на 18 мМ-экв/кг, по меди было близко к нему (123-125 мМ-экв/кг). Вызывает опасение загрязнение почвы кадмием и в особенности свинцом. Q_{\max} составила всего 61 мМ-экв/кг по Ленгмюру и 59 мМ-экв/кг – по Дубинину–Радушкевичу. При органоминеральной системе удобрения цинк, медь и кадмий прочнее удерживаются почвой: энергия связывания ($-\Delta G$) составила соответственно 11,33; 12,53 и 13,18 кДж/моль.

Установлено влияние $pH_{\text{обм}}$ на Q_{\max} цинка и его активность в области низких исходных концентраций элемента в растворе. Установлено достоверное уменьшение значения Q_{\max} на 0,12 – 0,15 мМ/кг (при $pH_{\text{сол}}$ ниже 5,0) по сравнению с величиной $pH_{\text{сол}}$ выше 5,0, установлено также увеличение концентрации цинка в 0,01 н $CaCl_2$ на 0,18 мг/кг, снижение энергии связывания. Возрастало содержание цинка и при повышении обеспеченности почвы подвижным фосфором. При подкислении почвы снижается буферная способность к загрязнению цинком (табл. 6).

Таблица 6. Влияние обменной кислотности, суммы обменных оснований и содержание подвижного фосфора на активность цинка

| Условие | Максимальная адсорбция (Q_{\max}), мМ/кг | | Цинк в 0,01 н $CaCl_2$, мг/кг | $-\Delta G$, кДж/М | BC^{Zn} , среднее $Q/C_{\text{равн}}$. |
|--|--|--------------------|--------------------------------|---------------------|---|
| | Ленгмюр | Дубинин-Радушкевич | | | |
| $pH_{\text{обм}} \leq 5,0$ | $0,58 \pm 0,04$ | $0,43 \pm 0,06$ | $0,63 \pm 0,17$ | $26,5 \pm 0,6$ | < 6 |
| $pH_{\text{обм}} \geq 5,0$ до 6,2 | $0,70 \pm 0,10$ | $0,58 \pm 0,08$ | $0,45 \pm 0,17$ | $28,7 \pm 2,0$ | > 6 |
| p мг-экв/100 г | | | < 0,05 | | |
| $Ca^{2+}+Mg^{2+} \geq 15$ | $0,72 \pm 0,03$ | $0,58 \pm 0,02$ | $0,43 \pm 0,03$ | $29,0 \pm 0,33$ | > 5 |
| $Ca^{2+}+Mg^{2+} \leq 15$ | $0,61 \pm 0,02$ | $0,46 \pm 0,02$ | $0,64 \pm 0,03$ | $27,2 \pm 0,22$ | < 5 |
| p | | | < 0,05 | | |
| $pH_{\text{обм}} \geq 5,0$; $P_2O_{5\text{подв}} \leq 15$ | $0,73 \pm 0,07$ | $0,61 \pm 0,08$ | $0,21 \pm 0,10$ | $29,7 \pm 1,54$ | < 6 |
| $pH_{\text{обм}} \geq 5,0$; $P_2O_{5\text{подв}} \geq 15$ | $0,70 \pm 0,15$ | $0,56 \pm 0,08$ | $0,50 \pm 0,23$ | $28,5 \pm 1,09$ | < 6 |
| p | | > 0,05 | < 0,05 | > 0,05 | > 0,05 |

Результаты исследований позволяют выделить три уровня устойчивости агросерой почвы к загрязнению с учетом конкретных почвенных условий. Низкий уровень устойчивости почвы проявляется при значении Q_{\max} по Ленгмюру меньше 91 мМ/кг по цинку, меньше 104 мМ/кг по меди, меньше 93 мМ/кг по свинцу и меньше 61 мМ/кг по кадмию; средний уровень устойчивости обеспечивается 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 гарантируется, если значение Q_{\max} превышает 93-143 мМ/кг в общем по отмеченным элементам.

Для достижения среднего уровня устойчивости значение буферности агросерой почвы не должно быть ниже (по изотерме адсорбции в точке концентрации 10 мМ/л) 2 л/кг для цинка, меди, кадмия и свинца. Превышение значения $ПБС^{ГМ}$ 2 – 4 л/кг означает переход на высокий уровень устойчивости.

Модель устойчивости агросерой почвы

Наши исследования были проведены на базе многолетних стационарных опытов с удобрениями, длительность которых составила более 40 лет. За это время в агросерой почве опытной станции сложились различные вариации почвенных условий с гумусом, подвижными формами фосфора и калия, кислотностью и т.д. Опыт с органическим удобрением по окультуриванию агросерой почвы указанные вариации расширил, разнообразил. Это дало основание для установления влияния основных почвенных свойств на формирование различных показателей буферности, которые отражают устойчивость почв к неблагоприятным воздействиям – возможному истощению элементами питания, ТМ, подкислению. Хорошо известно, что из почвенных компонентов самыми высокими значениями емкости катионного обмена обладают гумусовые вещества, но на их сорбционные свойства большое влияние оказывают условия среды, например, кислотность. Во многом от гумуса будет зависеть формирование показателей буферности, устойчивости почвы. Поэтому одним из главных критериев градации устойчивости является содержание гумуса. В опытах его содержание колебалось от 2 до 5 %. Для агросерой тяжелосуглинистой почвы 2 % гумуса и ниже – значения низкие [14]. По-видимому, такие почвы не будут обладать надежной устойчивостью, в особенности на фоне повышенной кислотности. В этой связи назовем такую устойчивость низкой. В агросерой почве можно поддерживать гумус на уровне 3 %. В этом случае возьмем за основу средний уровень устойчивости. В производственных условиях агросерые почвы Рязанской области не содержат гумуса свыше 3 %. Однако эту цифру не следует считать предельной. Повышение 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 проводились поправки на кислотность, содержание подвижных форм элементов питания, которые оценивались показателями буферности. Поэтому при разработке модели устойчивости агросерой почвы учитывалась динамичность комплекса почвенных условий.

Конечной целью наших исследований было разработка модели плодородия агросерой тяжелосуглинистой почвы, отражающей ее устойчивость к неблагоприятным воздействиям. 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 таблице 7 показатели, отражающие три уровня устойчивости почвы относительно низкий, средний и высокий. Длительность полевых многолетних опытов и их схемы позволяют получить достоверный экспериментальный материал и в сравнительном изучении вариантов ранжировать как минимум три состояния указанных физико-

химических параметров, а значит функционирования почвы, соответствующие условно низкому, среднему и высокому уровням устойчивости.

Таблица 7. Модель устойчивости плодородия агросерой тяжелосуглинистой почвы

| Показатели | Единица измерения | Уровень устойчивости почвы | | |
|--|-------------------------------|----------------------------|-------------|---------|
| | | низкий | средний | высокий |
| Гумус | % | < 2,0 | 2 – 3 | > 3,0 |
| $pH_{обм}$ | | < 4,5 | 4,5 – 6,0 | > 6,0 |
| Подвижный калий | мг/100г | < 12,0 | 12,0 – 17,0 | > 17,0 |
| Подвижный фосфор | мг/100г | < 7,0 | 7,0 – 15,0 | > 15,0 |
| Общая за интервалы pH емкость буферности к подкислению (ЕБк) | мМ-экв/100 г | < 9 | 9 – 11 | > 11 |
| 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 |
| Буферность к загрязнению по изотерме адсорбции в точки концентрации: | | | | |
| | | цинк | | |
| 5 | | < 4 | 4 – 7 | > 7 |
| 10 | | < 2 | 2 – 4 | > 4 |
| | | медь | | |
| 5 | | < 5 | 5 – 6 | > 6 |
| 10 | | < 2 | 2 – 3 | > 3 |
| | | кадмий | | |
| 5 | | < 4 | | > 4 |
| 10 | | < 2 | | > 2 |
| | | свинец | | |
| 5 | | < 2 | 2 – 6 | > 6 |
| 10 | | < 1 | 1 – 4 | > 4 |
| Относительная активность калия (AR_o) | М/л · 10 ⁻³ | < 2 | 2 – 4 | > 4 |
| Потенциальная калийная буферность (РБС ^к) | Фактор емкости в 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 ($-Q_o$) | мг P/100 г | < 0,7 | 0,7 – 1,4 | > 1,4 |
| Потенциальная фосфатная буферность (РБС ^р) | мл/г | < 34 | 34 – 45 | > 45 |

При относительной активности калия ниже 2 М/л·10⁻³ (РБС^к < 24), 2 – 4 М/л·10⁻³ (45 > РБС^к > 24) и более 4 М/л·10⁻³ (РБС^к < 24) достигаются соответственно низкий, средний и высокий уровни устойчивости серой лесной почвы.

При $P_{равн}$ в вытяжке 0,01 М CaCl₂, емкости десорбции и потенциальной буферной способности менее 0,1 мг/л, 0,7 мг P/100 г и 34 мл/г соответственно степень устойчивости агросерой почвы расценивается как низкая. Средний уровень устойчивости обеспечивается при $P_{равн}$ от 0,1 до 0,2 мг/л, Q_0 – от 0,7 до 1,4 мг P/100 г и PBC^p – от 34 до 45 мл/г; высокий уровень устойчивости при $P_{равн}$ более 0,2 мг/л, Q_0 более 1,4 мг P/100 г и PBC^p более 45 мл/г.

Если общая за интервалы рН емкость буферности к подкислению 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 снижение емкости буферности к подкислению до значений менее 9 мМ-экв/100 г.

В длительных опытах с калийными удобрениями установлены достоверные прибавки урожайности сельскохозяйственных растений, которые колебались в зависимости от вида удобрения и ротации в пределах 1,8 – 6,5 ц/га з.ед. (Костин, 2000). В среднем за 8 ротаций прибавка составила 5,0 ц/га з.ед. На варианте без удобрений продуктивность севооборота составила около 24 ц/га з.ед. Данные по урожайности согласуются с данными по калийному режиму агросерой почвы. Поэтому условно примем, что при продуктивности сельскохозяйственных растений менее 24 ц/га з.ед. уровень устойчивости агросерой почвы будет низкий. Средний уровень устойчивости обеспечивается при продуктивности от 24 до 29 ц/га з.ед., высокий – при более 29 ц/га з.ед. Аналогичная закономерность наблюдалась и в опыте с фосфорными удобрениями.

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

ВЫВОДЫ

1. 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 ухудшается за счет уменьшения емкости буферности к кислоте. Длительное использование хлористого аммония в дозе 60 кг/га д.в. может понизить значение рН агросерой тяжелосуглинистой почвы при содержании гумуса 2,1 – 2,2 % до 4,4, емкости буферности к кислоте – до 4,17 мМ-экв/100 г. Для сравнения при рН 5,7 ед. емкость буферности составит 7,63 мМ-экв/100 г.; при кислотности почвы близкой к нейтральной, но увеличении содержания гумуса до 3,0 % значение емкости буферности к кислоте может повысится до 10,8 мМ-экв/100 г.

2. Устойчивость почв к загрязнению зависит от содержания органического вещества, кислотности почвенного раствора. На примере цинка установлено, что при условии значений рН и суммы обменных

оснований в агросерой почве соответственно ниже и выше 5 и 15 мг-экв/100 г каждого показателя максимальной адсорбции и энергия связывания элемента увеличивается на 16 – 19 % и 6 – 8 % при переходе почвы от среднекислых к слабокислым.

3. Для достижения оптимальной активности калия 0,002 – 0,0035 М/л, содержание гумуса должно быть не ниже 3,0 %, подвижного калия – 20 мг/100 г. При превышении гумуса 3 % (не более 3,5 %) и подвижного калия 20 мг/100 г РБС^к увеличивается в два раза (с 20 – 24 до 40 – 45). При таком диапазоне РБС^к достигается относительная активность калия в пределах 0,002 – 0,003 М/л.

4. Наибольшая величина потенциальной буферной способности к фосфору достигается при содержании гумуса и равновесного фосфора в почве больше 2,5 % и 0,11 мг/л соответственно. РБС^р при отмеченных условиях обусловлено увеличением десорбционной способности до 1,9 мг/100 г. При гумусе < 2,5, равновесного фосфора более 0,11 – десорбция фосфора составит 1,5 мг/100 г. Аналогичная закономерность установлена для гумуса больше 2,5 % и рН_{обм} выше 4,5. Поэтому повышение в почве органического вещества, фосфора, снижение кислотности способствуют улучшению буферных свойств агросерой почвы.

5. Разработана ориентировочная, ранжированная на 3 уровня модель устойчивости агросерой тяжелосуглинистой почвы: низкий, средний и высокий. Если общая за интервалы рН емкость буферности к кислоте 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.

Для достижения среднего уровня устойчивости значение буферности агросерой почвы не должно быть ниже (на примере изотерм адсорбции в точке концентрации 10 мМ/л) 2 л/кг для цинка, меди, кадмия и свинца. Превышение значения буферности к тяжелым металлам 2 – 4 л/кг означает переход на высокий уровень устойчивости.

При относительной активности калия ниже 2 М/л · 10⁻³ (РБС^к < 24), 2 – 4 М/л · 10⁻³ (45 > РБС^к > 24) и более 4 М/л · 10⁻³ (РБС^к < 24) достигаются соответственно низкий, средний и высокий уровни устойчивости агросерой почвы.

Средний уровень устойчивости обеспечивается при содержании равновесного фосфора от 0,1 до 0,2 мг/л, емкость десорбции фосфора – от 0,7 до 1,4 мг Р/100 г и РБС^р – от 34 до 45 мл/г; высокий уровень устойчивости при равновесной концентрации фосфора более 0,2 мг/л, емкости десорбции более 1,4 мг Р/100 г и РБС^р более 45 мл/г.

Список основных опубликованных работ по теме диссертации

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. **Головина, Н.А.** Физико-химический блок плодородия агросерой почвы / Р.Н. Ушаков, Н.А. Головина, Д.В. Виноградов // *Агрохимический вестник*. – 2013. – № 5. – С. 012 – 013.
2. **Головина, Н.А.** К вопросу о калийной буферности серой лесной почвы / Р.Н. Ушаков, Н.А. Головина, Е.В. Федорова // *Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета имени П.А. Костычева*. – 2015. – № 4 (28). – С. 140 – 144.
3. **Головина, Н.А.** Калийная буферность – показатель плодородия почвы / Р.Н. Ушаков, Н.А. Головина // *Плодородие*. – 2016. – № 1 (88). – С. 17 – 20.
4. **Головина, Н.А.** Биодиагностика плодородия серой лесной почвы / Р.Н. Ушаков, Н.А. Головина, А.А. Старцева // *Аграрная наука*. – 2016. – № 5. – С. 4 – 6.
5. **Головина, Н.А.** Ретроспективная оценка агрохимического состояния пахотных почв Рязанской области / Р.Н. Ушаков, Н.А. Головина, А.А. Старцева // *Международный сельскохозяйственный журнал*. – 2016. – № 4. – С. 20 – 25.
6. **Головина, Н.А.** Зависимость фосфатной буферности серой лесной тяжелосуглинистой почвы от агрохимических свойств / Р.Н. Ушаков, А.В. Кобелева, Я.В. Костин [и др] // *Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета имени П.А. Костычева*. – 2017. – № 3 (35). – С. 74 – 78.
7. **Головина, Н.А.** Агрохимическая модель агросерой почвы. / Р.Н. Ушаков, Н.А. Головина // *Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии*. – 2018. – Вып.1. – С. 36 – 47.

Публикации в других изданиях

1. Ушаков, Р.Н. Физико-химический блок плодородия агросерой почвы / Р.Н. Ушаков, **Н.А. Головина** // *Аграрная наука – сельскому хозяйству : сб. материалов VIII Международ. науч.-практ. конф.: в 3 кн.* – Барнаул : АГАУ, 2013. – Кн. 1. – С. 391 – 393.
2. Ушаков, Р.Н. Изменение минералогического состава, буферности агросерой лесной почвы под влиянием удобрений / Р.Н. Ушаков, Я.В. Костин, Н.П. Чижикова, **Н.А. Головина** // *Проблемы механизации агрохимического обслуживания сельского хозяйства : сб. научн. тр. по материалам заочной международной науч.-практ. конф. ФГБНУ ВНИМС.* – Рязань, 2014. – С. 80 – 94.
3. **Головина, Н.А.** Изменение минералогического состава агросерой почвы под влиянием удобрений / Н.А. Головина, Я.В. Костин, Р.Н. Ушаков // *Аграрная наука как основа продовольственной безопасности региона :*

Материалы 66-й Международной науч.-практ. конф. – Рязань: РГАТУ, 2015. – Часть 1. – С. 56 – 59.

4. **Головина, Н.А.** Устойчивость агросерой почвы к загрязнению тяжелыми металлами / Н.А. Головина, Е.В. Федорова, А.А. Кодиров // Вестник Совета молодых ученых Рязанского государственного агротехнологического университета имени П.А. Костычева. – 2015. – № 1. – С. 73 – 78.

5. Ушаков, Р.Н. Влияние удобрений на минералогический состав агросерой почвы / Р.Н. Ушаков, **Н.А. Головина**, Е.В. Федорова, А.А. Кодиров // Современные энерго- и ресурсосберегающие экологически устойчивые технологии и системы сельскохозяйственного производства : сборник науч. тр. / под ред. Н.В. Бышова. Вып. 12. – Рязань: ФГБОУ ВО РГАТУ, 2016. – С. 446 – 449.

6. Ушаков, Р.Н. Устойчивость агросерых почв (серых лесных) к неблагоприятным воздействиям / Р.Н. Ушаков, **Н.А. Головина**, Е.В. Федорова // Научное обеспечение развития АПК в условиях импортозамещения : сб. науч. тр. междунар. науч.-практ. конф. профессорско-преподавательского состава «Научное обеспечение развития АПК в условиях импортозамещения». Ч. 1 / СПбГАУ. – СПб. – 2016. – С. 152 – 156.

7. Ушаков, Р.Н. Устойчивость почвы – современный взгляд на проблему / Р.Н. Ушаков, **Н.А. Головина**, А.В. Кобелева // Инновационное развитие современного агропромышленного комплекса России : сб. тр. Национальной науч.-практ. конф. – Рязань: РГАТУ, 2016. – Часть 1. – С. 208 – 213.

8. Ушаков, Р.Н. Плодородие – фактор стабилизации микробиологической активности серой лесной почвы / Р.Н. Ушаков, Я.В. Костин, **Н.А. Головина**, А.В. Кобелева // Фундаментальные и прикладные основы сохранения плодородия почвы и получения экологически безопасной продукции растениеводства. : Материалы Всероссийской науч.-практ. конф. с Международным участием, посвященной 75-летию со дня рождения д.с.-х.н, профессора Куликовой А.Х. – Ульяновск, 2017. – С. 382 – 385.