

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Российский государственный аграрный университет-
МСХА имени К.А. Тимирязева»

УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по науке и
инновационному развитию

А.В. Журавлев

«16» мая 2024 г.

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

по оптимизации кислотно-основного и окислительно-восстановительного состояния в системе почва-растение на примере дерново-подзолистых почв и обыкновенных черноземов

Москва - 2024


П. А. Белосмуков

В научных исследованиях и разработке рекомендаций принимали участие к.с.-х.н. Гукалов В.В., д.с.-х.н., к.х.н. профессор Белопухов С.Л., д.с.-х.н. профессор Савич В.И., д.с.-х.н. профессор Байбеков Р.Ф., к.х.н. доцент Браташ Г.С.

Гукалов, В.В. Методические рекомендации по оптимизации кислотно-основного и окислительно-восстановительного состояния в системе почва – растение на примере дерново-подзолистых почв и обыкновенных черноземов // В.В. Гукалов, С.Л. Белопухов, В.И. Савич, Р.Ф. Байбеков, Г.С. Браташ. / Под ред. проф. Белопухова С.Л. / М.: РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева. - 2024. - 44 с.

Рекомендации предназначены для студентов, бакалавров и магистров, обучающихся по направлению 35.03.04 – «Агрономия», 35.03.03 – «Агрохимия и агропочвоведение», 05.03.06 – «Экология и природопользование», 35.03.05 – «Садоводство», а также аспирантов, преподавателей высших учебных заведений сельскохозяйственного профиля, руководителей сельскохозяйственных предприятий, агрохимиков, почвоведов, специалистов станций защиты растений, экологов, агрономов, фермеров.

Методические рекомендации рассмотрены и утверждены на Ученом совете института агробιοтехнологии РГАУ – МСХА имени К.А. Тимирязева, протокол № 07/05 от 16 мая 2024 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

	СТР.
Информационно-энергетическая и интегральная оценка кислотно-основного и окислительно-восстановительного состояния в системе почва-растение	4
Энергетическая оценка кислотно-основного и окислительно-восстановительного состояния почв	4
Влияние pH и Eh среды на содержание в почвах заряженных частиц	5
Информационная оценка кислотно-основного и окислительно-восстановительного состояния почв	9
Интегральная оценка окислительно-восстановительного и кислотно-основного состояния почв и урожай сельскохозяйственных культур	12
Внесение в почву биофильных элементов с пожнивными остатками	15
Изменение эффективности применения минеральных удобрений на черноземах и дерново-подзолистых почвах при неоправданном увеличении их доз	20
Кислотно-основное и окислительно-восстановительное состояние почв и образование агрономически ценной структуры	23
Кислотно-основное и окислительно-восстановительное состояние системы почва-растение, как интегральный показатель, характеризующий состояние и развитие почв	24
Кислотно-основные свойства и режимы почв	27
Свойства, процессы, режимы окислительно-восстановительного состояния почв	29
Информационная оценка окислительно-восстановительного состояния почв	30
Влияние окислительно-восстановительного и кислотно-основного состояния почв на их структурное состояние	32
Экономическая оценка окислительно-восстановительного и кислотно-основного состояния в системе почва-растение	35
Оптимизация окислительно-восстановительных и кислотно-основных свойств почв и урожай сельскохозяйственных культур	37
Проявление закона убывающей отдачи при интенсивном развитии сельскохозяйственного производства	40
Кислотно-основное и окислительно-восстановительное состояние почв и образование агрономически ценной структуры	41

Информационно-энергетическая и интегральная оценка кислотно-основного и окислительно-восстановительного состояния в системе почва-растение

Энергетическая оценка кислотно-основного и окислительно-восстановительного состояния почв

Энергетическая оценка кислотно-основного и окислительно-восстановительного состояния почв идентифицируется по взаимосвязям свойств почв с pH и Eh среды, по составу продуктов испарения из почв, содержанию в почвах положительно и отрицательно заряженных комплексных соединений ионов, оксидантов и антиоксидантов, содержанию в испарениях из почв положительно и отрицательно заряженных аэроионов.

При избыточном увлажнении почв в модельных опытах при непромывном типе водного режима в почвенных растворах увеличивается отношение Ca/Mg и Fe/Mn. Это иллюстрируется данными следующей таблицы 1, где представлено соотношение катионов в почвах (г/мл), компостировавшихся при оптимальном и избыточном увлажнении (n = 16).

Таблица 1 - Соотношение катионов в почвах в условиях оптимального и избыточного увлажнения

Почва	Вариант увлажнения	Ca/Mg	Fe/Mn
дерново-подзолистая, контроль	оптимальное	131,6±23,3	0,02
		55,3±8,6	8,56±3,1
	избыточное	36,2±3,3	0,16±0,02
		7,7±0,8	10,40±1,3
дерново-подзолистая хорошо окультуренная	оптимальное	145,6±15,7	3,2±1,7
		65,6±3,1	0,11±0,01
	избыточное	64,4±6,7	4,20±0,8
		22,8±1,7	

Как видно из представленных данных, избыточное увлажнение почв приводит к увеличению подвижных железа и марганца и уменьшению подвижности кальция и магния. При этом увеличивается отношение подвижных Ca/Mg и Fe/Mn.

Изменение Eh сопровождается изменением содержания нитратов в почве и подвижных соединений. Это имеет важное агрономическое значение. Избыточное увлажнение исследуемых почв способствует подщелачиванию среды, восстановлению почв, что приводит к увеличению подвижности железа и марганца, к увеличению отношения Ca/Mg и Fe/Mn, к уменьшению активности

NO₃.

Избыточное увлажнение почв приводит и к изменению соотношения подвижных катионов в почвах, что важно знать при корректировке системы удобрений на почвах разной степени гидроморфности и в зависимости от погодных условий.

Влияние pH и Eh среды на содержание в почвах заряженных частиц

pH и Eh среды определяют процессы ионного обмена, растворения осадков, комплексообразования, в т.ч. реакции протонирования и гидратообразования комплексов. С увеличением напряжения на электродах и времени электролиза количество вытесняемого из почв железа возрастает. Оно увеличивается в почве в условиях избыточного увлажнения по сравнению с почвой оптимального увлажнения. При этом в почве избыточного увлажнения несколько больше доля положительно заряженных соединений железа, очевидно, не связанных с органическими лигандами.

Избыточное увлажнение почв и возникающие при этом изменения pH и Eh почв приводят к изменению состава продуктов испарений из почв. Это приводило и к разной биологической активности этих испарений.

Как видно из представленных данных, биологической активностью обладают как испарения из почв, так и продукты транспирации растений. Эти продукты большее влияние оказывали на корни проростков, по сравнению со стеблями. Биологическая активность отличалась для продуктов испарений разных почв и горизонтов. Биологическая активность испарений из гумусированных пахотных слоев была выше, а из оглеенных горизонтов – ниже

В другом эксперименте для сорбции газов из воздуха применяли активированный уголь, который помещали в чашки Петри с семенами кресс-салата, заливали 10 мл дистиллированной воды, ежедневно контролировали всхожесть, энергию прорастания, длину корней и длину стеблей. Химические вещества, выделяемые из почв, оказывают различное действие на динамику прорастания семян, как это следует по семенам кресс-салата. Наиболее динамично развиваются проростки, на которые оказывает действие комплекс химических соединений из верхних горизонтов, в которых содержание органических веществ больше, чем в нижних горизонтах. Однако имеются и отклонения от этого, что можно объяснить наличием органических компонентов от корневых систем растений, которые при разложении выделяют физиологически активные вещества, ускоряющие рост и развитие семян и проростков. В целом, состав испарений из горизонта A₂ в меньшей степени стимулировал рост и развитие корней, чем состав испарений из других

горизонтов. Аналогично, состав испарений из глеевого горизонта А₂В оказал меньшее ростстимулирующее действие на развитие проростков.

В исследованных образцах также было проведено определение концентрации ионов тяжелых металлов в испарениях из почв, т.е. в газовой фазе над раствором. Очевидно, что в соответствии с законом Генри при загрязнении почв различными металлами, например, свинцом, содержание его в испарениях в газовой фазе из почв возрастает. Причем возрастание концентрации ионов металлов может быть значительным. Установлено, что в испарениях из черноземов увеличение концентрации свинца и меди может возрасти на 30-35% (до 0,07-0,08 мг/л); никеля – в 20 раз (до 0,2 мг/л); железа – в 5 раз (до 0,02 мг/л). При определении концентраций металлов в газовой фазе из деградированного чернозема с меньшим содержанием гумуса концентрация Рb в испарениях из почв по сравнению с раствором увеличилась в 5-5,5 раз (до 1,1 мг/л), Fe – в 1,7-2 раза (до 0,05-0,06 мг/л); Mn – в 10 раз (до 0,2 мг/л); Cu – в 2 раза (до 0,02 мг/л).

Изменение окислительно-восстановительного и кислотно-основного состояния почв приводит к изменению динамики испарения из почв аэроионов. Наличие как в почве, так и в газовой фазе различающихся по составу, по массе, заряду положительно и отрицательно заряженных аэроионов способно влиять на рост и развитие растений, в конечном итоге увеличивая урожай и качество сельскохозяйственных культур.

В проведенных ранее исследованиях было установлено, что под действием оптимальных доз отрицательных аэроионов увеличивается всхожесть и энергия прорастания семян, возрастает динамика роста и развития растений. Основное количество отрицательно заряженных аэроионов в воздухе – это отрицательные ионы кислорода, например, O₂⁻, которые постоянно образуются в природе под действием различных факторов. Отрицательные ионы кислорода оказывают благоприятное воздействие на растения, животных и человека.

Положительно заряженные аэроионы оказывают негативное действие на организм. В то же время, отсутствие в воздухе аэроионов обеих полярностей негативно действует на биологические объекты.

Нормальные показатели аэроионов (ион/см³) составляют 1000-1400; воздух в крупных городах имеет их содержание 1100-1500; воздух электрокурортов - 1800-3700; воздух вблизи водопадов и прибоя - (100-200).

В качестве объектов исследования, использовался почвенный раствор над дерново-подзолистой почвой среднесуглинистого гранулометрического состава (горизонт А_п), компостированной 2 недели в условиях оптимальной и избыточной влажности. Для сравнения исследовалось содержание аэроионов над

черноземом, Ап), компостированным в условиях оптимальной и избыточной влажности с загрязнением и без загрязнения свинцом, а также над таким же черноземом, дегумифицированным (выпаханным), загрязненным и не загрязненным Pb. Можно отметить тренд увеличения доли положительно заряженных аэроионов при загрязнении почв свинцом, а также при добавлении помета. При оценке полученных данных с использованием непараметрических критериев различия содержание положительно заряженных аэроионов в черноземе выше в 2 случаях из 8, при добавлении свинца - в 7 случаях из 8. В деградированном (выпаханном) черноземе содержание положительно заряженных аэроионов выше, чем отрицательно заряженных - в 4 случаях из 8; при добавлении свинца - в 6 случаях из 8.

При загрязнении почв свинцом несколько возрастает количество аэроионов положительной полярности, уменьшается содержание аэроионов отрицательной полярности, и увеличивается коэффициент униполярности. В испарениях из почв избыточного увлажнения, по сравнению с испарениями из почв оптимального увлажнения, несколько уменьшается доля аэроионов отрицательной полярности и коэффициент униполярности.

Содержание аэроионов в дерново-подзолистых почвах и черноземах, компостированных в условиях оптимального и избыточного увлажнения приведены в таблице 2.

Таблица 2 - Содержание аэроионов и коэффициент униполярности в испарениях из почв, загрязненных и незагрязненных свинцом и компостированных в условиях оптимального и избыточного увлажнения, n = 8

Вариант	Концентрация аэроионов, ион/см ³		K _{униполярности}
	«+» полярности	«-» полярности	
чернозем оптимального увлажнения	$< 0,1 \cdot 10^3$	$(0,3 \pm 0,2) \cdot 10^3$	сред. – $1,0 \pm 0,1$ max – 2,0 min – 0,5
чернозем избыточного увлажнения	$(0,12 \pm 0,02) \cdot 10^3$	$(0,2 \pm 0,1) \cdot 10^3$	сред. – $3,2 \pm 2,7$ max – 23,0 min – 0,0
чернозем оптимального увлажнения + Pb	$< 0,1 \cdot 10^3$	$(0,12 \pm 0,01) \cdot 10^3$	сред. – $8,5 \pm 7,7$ max – 66,0 min – 0,0
чернозем избыточного увлажнения + Pb	$< 0,1 \cdot 10^3$	$(0,11 \pm 0,01) \cdot 10^3$	сред. – $1,1 \pm 0,2$ max – 2,0 min – 0,07
дерново-подзолистая почва оптимального увлажнения	$< 0,1 \cdot 10^3$	$(0,11 \pm 0,01) \cdot 10^3$	сред. – $1,7 \pm 0,7$ max – 7,0 min – 1,0
дерново-подзолистая почва	$< 0,1 \cdot 10^3$	$< 0,1 \cdot 10^3$	сред. – $1,4 \pm 0,5$ max – 4,4

избыточного увлажнения			min – 0,0
чернозем деградированный оптимального увлажнения	$< 0,1 \cdot 10^3$	$< 0,1 \cdot 10^3$	сред. – $3,2 \pm 0,9$ max – 8,0 min – 0,8
чернозем деградированный избыточного увлажнения	$< 0,1 \cdot 10^3$	$< 0,1 \cdot 10^3$	сред. – $1,5 \pm 0,5$ max – 5,0 min – 0,5
чернозем деградированный оптимального увлажнения + Pb	$< 0,1 \cdot 10^3$	$(0,12 \pm 0,02) \cdot 10^3$	сред. – $1,6 \pm 0,7$ max – 7,0 min – 0,1
чернозем деградированный избыточного увлажнения + Pb	$0,13 \pm 0,01$	$(0,1 \pm 0,01) \cdot 10^3$	сред. – $7,5 \pm 1,9$

Таким образом, представленные результаты, могут коррелировать с энергетическими характеристиками для изучаемой термодинамической системы и могут быть дополнительной энергетической характеристикой почвы, водных вытяжек, состава газовой фазы.

Относительная оценка энергетического состояния исследуемых объектов может быть проведена при среднеарифметической оценке данных показателей от 100%: $\sum X_i / X_{\max}$. Однако, более вероятно, что каждый из этих показателей характеризует энергетику в неодинаковой степени, и интегральный показатель - есть функция: $(\sum k_i X_i) : (X_{\max} / n)$. В данном соотношении важной величиной является величина k_i (степень влияния X_i на энергетику объекта), которая может быть определена экспериментально с учетом возрастающих аналитических возможностей. Рассчитанные нами данные по интегральным энергетическим показателям почв и водных вытяжек из них представлены на рисунке 1.

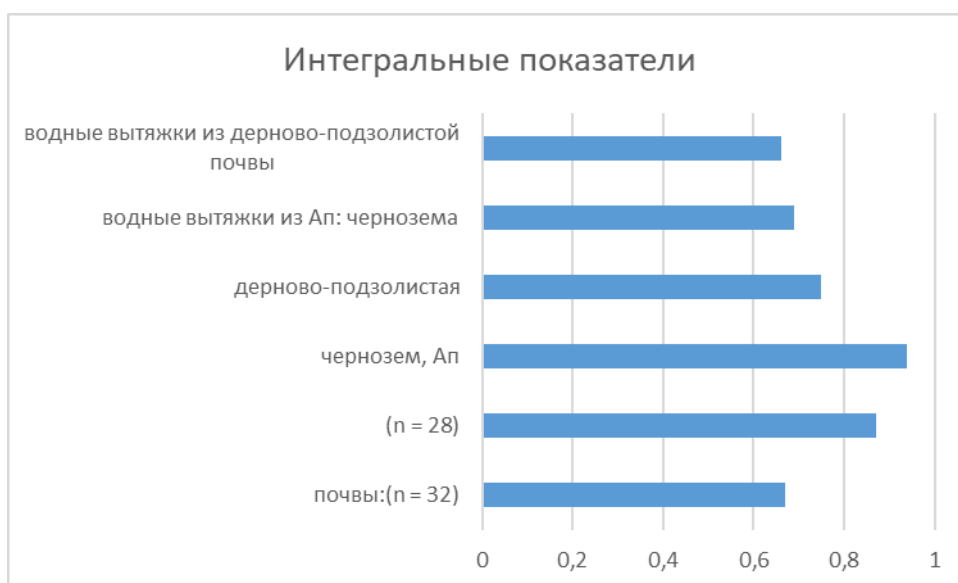


Рисунок 1 - Интегральные энергетические показатели почв и водных вытяжек из них

Интегральные энергетические показатели выше для почв, чем для водных вытяжек из них. Очевидно, что в почвенных образцах они будут отличаться по сезонам года, системам удобрений, севооборотам и т.д. В почвах максимальной энергетикой обладает чернозем. Аналогичная тенденция и для водных вытяжек из почв, что коррелирует с ранее проведенными исследованиями.

Таким образом,

1. Предлагается энергетическая оценка кислотно-основного и ОВ состояния почв по изменению подвижности ионов в почвах при их компостировании в условиях оптимального и избыточного увлажнения, по содержанию положительно и отрицательно заряженных комплексных соединений ионов в почве, по составу аэроионов, испаряющихся из почв, по параметрам, оцениваемым в изучаемых почвах методом газоразрядной визуализации, по содержанию в почвах оксидантов и антиоксидантов.

2. В условиях избыточного увлажнения почв и при развитии восстановительных условий увеличивается содержание водорастворимых соединений железа, марганца, при этом увеличивается соотношение Fe/Mn, Ca/Mg, уменьшается содержание NO_3 , уменьшается соотношение положительно и отрицательно заряженных комплексных соединений катионов, уменьшается биологическая активность, оцениваемая методов биотестов – прорастанием семян.

В испарениях из избыточно увлажненных почв несколько уменьшилась доля аэроионов отрицательной полярности. В почвенных растворах избыточно увлажненных почв увеличилась антирадикальная активность почвенных

растворов и содержание в них антиоксидантов.

Информационная оценка кислотно-основного и окислительно-восстановительного состояния почв

Информационная оценка окислительно-восстановительного и кислотно-основного состояния почв проводится по математическим взаимосвязям между свойствами почв, по их изменению во времени и в пространстве.

Информационная оценка окислительно-восстановительного и кислотно-основного состояния почв идентифицируется по кинетике и термодинамике протекающих процессов, депонирующей способности, суспензионному эффекту, наличию в почвах положительно и отрицательно заряженных соединений, по составу продуктов испарений из почв и транспирации из растений, по составу в испарениях из почв положительно и отрицательно заряженных аэроионов, легких и тяжелых аэроионов, содержанию в почвенных растворах оксидантов и антиоксидантов.

Информационную оценку целесообразно проводить для свойств, процессов и режимов, для системы почва – растение - микроорганизмы. По полученным нами данным, чаще отмечается последовательность влияния кислотно-основного и окислительно-восстановительного состояния почв на их свойства во времени и в пространстве (по профилю почв, в структуре почвенного покрова, в слоях и гранях структурных отдельностей, в прикорневой зоне).

Отмечается синергизм и антагонизм влияния кислотно-основного и окислительно-восстановительного состояния на свойства почв. Это иллюстрируется представленными ранее графиками. Для оценки взаимосвязи и влияния каждой характеристики почвы и ее динамики во времени необходимо оценивать их математическим уравнениям и по уравнениям парной корреляции множественной регрессии. При повышении pH от 4,5 до 6,0 подвижность фосфатов в дерново-подзолистых почвах возрастает, при pH = 6-7 – стабилизируется, а при pH > 8,0, в связи с образованием 3-х замещенных фосфатов, их подвижность в почве падает.

При увеличении содержания гумуса в почве и изменении Eh характер всех взаимосвязей свойств почв изменяется. Он нарушается и при значительном увеличении или уменьшении величины хотя бы одной из независимых переменных.

Важное агроэкологическое значение имеют закономерности изменения свойств почв от pH и Eh среды. При этом отмечается синергизм и антагонизм влияния pH и Eh на отдельные свойства почв. Это влияние отличается в разных интервалах pH и Eh, зависит от последовательности реакций. Как правило,

протекание одних реакций подготавливает условия для протекания последующих реакций.

По полученным данным pH среды коррелирует с содержанием обменного К. Так, в дерново-подзолистых почвах при $pH_{KCl} = 4-5$ содержание обменного калия составляло при содержании гумуса 1-2% - 81 мг/кг, при 2-3% гумуса – 127 мг/кг; при содержании больше 3% гумуса – 136 мг/кг. При $pH = 6-7$ эти показатели были соответственно равны 226, 264 и 367 мг/кг.

Содержание гумуса и pH среды в значительной степени влияют и на подвижность фосфатов. Так, для дерново-подзолистых почв хозяйства «Красный Балтиец» Московской области при $pH_{KCl} = 4-5$ и содержании гумуса для разных вариантов опытов на уровне 1-2, 2-3 и > 3 содержание подвижных фосфатов в почвах составляло 121 ± 6 , 125 ± 7 и 107 ± 5 мг/кг, а при $pH = 6-7$ соответственно 227 ± 14 , 457 ± 25 и 337 ± 17 мг/кг.

Для дерново-подзолистых почв хозяйства «Прогресс» Московской области содержание подвижных форм P_2O_5 при $pH = 4-5$ и содержании гумуса 1-2, 2-3 и $> 3\%$ составляло соответственно 102,0; 66,2 и 111,7 мг/кг, а при $pH > 6,0$ соответственно 163,5; 200,8 и 215,1 мг/кг.

С агрономической точки зрения важное значение имеет появление неблагоприятных свойств почв при их затоплении (токсичных концентраций Fe^{2+} , Mn^{2+} , Al^{3+} , CO_2 , H_2S , NH_3).

Совместное влияние pH и содержания гумуса проявляется и по изменению подвижности в почвах микроэлементов. Так, для хозяйства «Красный Балтиец» Московской области на дерново-подзолистых почвах при $pH = 4-5$ и содержании гумуса 1-2, 2-3 и > 3 содержание бора составляло 0,33; 0,46 и 1,32 мг $кг^{-1}$, содержание цинка соответственно 0,7; 1,4 и 2,2 мг/кг. При $pH = 6-7$ и содержании гумуса 1-2; 2-3 и > 3 содержание бора составляло соответственно 0,45; 0,47 и 0,55 мг/кг, а содержание цинка соответственно 0,7; 1,3 и 1,6 мг/кг.

Оптимум кислотно-основного состояния почв можно оценить по взаимосвязи pH и свойств почв, как это было предложено ранее и подтвердилось в последующих исследованиях.

Важное агроэкологическое значение имеют реакции протонирования и гидратообразования, окисления и восстановления компонентов комплексных соединений катионов, органических лигандов, поливалентных катионов и анионов.

Существуют закономерные взаимосвязи pH и Eh, параметров кислотно-основного и окислительно-восстановительного состояния почв с отношением в почвах $C_{гк}/C_{фк}$, содержанием гумуса, подвижностью поливалентных катионов, фосфатов, сульфатов, нитратов и других анионов с образованием различных

структур, трансформацией комплексных соединений, очередностью, глубиной и кинетикой протекающих в почвах реакций, локальностью протекающих процессов, с гистерезисом, с оптимумом свойств почв для разных целей их хозяйственного использования.

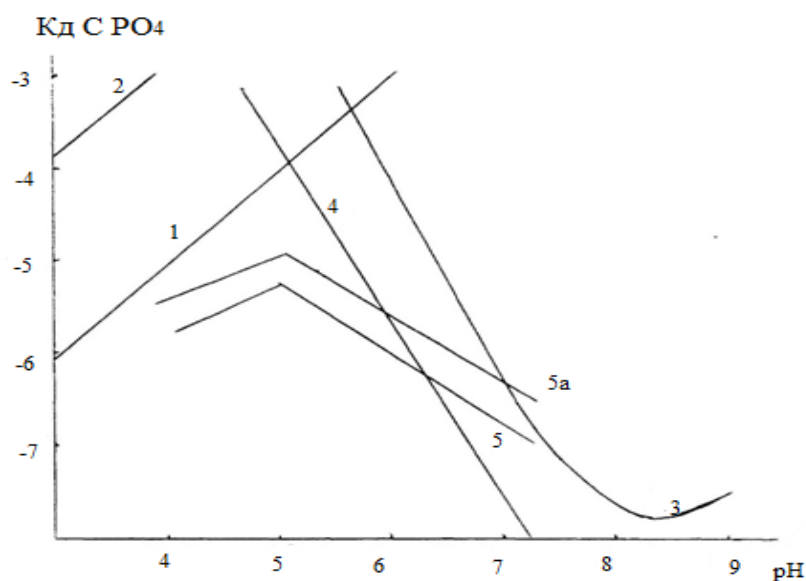
Кислотно-основное и окислительно-восстановительное состояние почв определяют и пути регулирования скорости и интенсивности почвообразовательных процессов и плодородия почв.

Зависимость изменения содержания подвижных форм на примере фосфора приведена на рисунке 2. Информационная оценка состоит и в определении зависимости урожая от свойств почв. По полученным данным, зависимость урожайности (Y) зерна кукурузы (ц/га) от свойств почв описывалась следующей зависимостью:

$$Y = -377,7 + 18,9(\Gamma) - 83,7(N) + 0,23(P) - 2,0(KC) + 13,2(\Pi) - 6,2(\Pi B)$$

$$r = 0,99; F = 19,2.$$

Как видно из представленного уравнения, урожайность зависела от физико-химических, агрохимических и водно-физических свойств почв. Для данных условий она в наибольшей степени повышалась при увеличении содержания гумуса (Г) и пористости почв (Π), в меньшей степени - при увеличении содержания подвижных фосфатов (Р). Урожайность не повышалась при повышении в исследуемых почвах содержания общего азота (N), коэффициента структурности (КС) и полной влагоемкости (ΠВ). В то же время, концентрация подвижных форм элементов питания в почвах существенно зависит не только от кислотности среды, но и от окисленного и восстановленного состояния почв. Эти закономерности рассмотрены ранее в соответствующих разделах диссертации.



1 – $AlPO_4$; 2 – $FePO_4$; 3 – $Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$; 4 – $Ca_{10}(PO_4)_6$; 5 – $MnHPO_4$; 5a – $MnHPO_4$

Выводы

1. Информационная оценка окислительно-восстановительного и кислотно-основного состояния почв характеризуется кислотно-основными и окислительно-восстановительными свойствами почв и математическими взаимосвязями между свойствами почв и в системе почва – растение – микроорганизмы, изменяющимися во времени и в пространстве.

2. Математические взаимосвязи между свойствами почв характеризуются уравнениями парной корреляции и уравнениями регрессии и уравнениями последовательных корреляций.

3. Уравнения математических взаимосвязей между свойствами почв правомочны в определенных лимитах независимых переменных и без изменения величины одного из независимых переменных.

Интегральная оценка окислительно-восстановительного и кислотно-основного состояния почв и урожай сельскохозяйственных культур

Кислотно-основное и окислительно-восстановительное состояние почв является интегральным показателем плодородия почв и в значительной степени определяет свойства почв и биопродуктивность угодий. Это иллюстрируется данными, полученными нами в опытах на дерново-подзолистых почвах и обыкновенных черноземах.

Уменьшение биопродуктивности угодий связано с подкислением почв. При слабой и средней степени подкисления дерново-подзолистых почв на пашне уменьшение стоимости земель составляет 5-7 и 15-18%, на кормовых угодьях при средней и сильной степени подкисления соответственно 6-8 и 10-12%. Для обыкновенных черноземов большее значение имеет не рН среды в пределах 7,0-6,0, а недостаток водорастворимого кальция.

Уменьшение биопродуктивности сельскохозяйственных угодий, в связи с их переувлажнением, приводит к уменьшению стоимости земель. Так, при нормальном увлажнении поправочный коэффициент на балл почв равен 1, при периодически повышенном поверхностном увлажнении – 0,8. При слабой и сильной степени подтопления уменьшению стоимости составляет для пашни 18-22% и 55-65%; для кормовых угодий – 12-15 и 40-45%; для лесных угодий – 15-18 и 45-55%.

Уменьшение стоимости земель в результате их переувлажнения отличается и для почв разного гранулометрического состава. При обратимости и необратимости процесса переувлажнения на легкосуглинистых почвах при

слабой степени переувлажнения ущерб в % составляет соответственно 4-5 и 8-10%; для сильной степени переувлажнения – 15-17% и 30-33%. Для среднесуглинистых почв ущерб при обратимой слабой степени переувлажнения составляет 5-6%, при необратимой степени процесса – 10-12%. При сильной степени переувлажнения этих почв ущерб составляет соответственно 18-20 и 35-38%.

Сочетание Eh и pH среды определяет содержание водорастворимых соединений железа и марганца в почвах. При избыточном увлажнении и более низких значениях Eh их содержание возрастает. При более низких значениях pH и Eh содержание водорастворимых соединений железа и марганца увеличивается. При избыточном увлажнении в модельных опытах при непромывном типе водного режима величина pH возрастает, Eh – падает, а содержание водорастворимых соединений железа и марганца возрастает. В полевых условиях в слабоокультуренной почве, по сравнению с хорошо окультуренной, ниже значения pH, что соответствует меньшему содержанию гумуса, азота, подвижного фосфора и обменного калия, уменьшению суммы поглощенных оснований.

При более кислой реакции среды отмечается увеличение в почвах содержания водорастворимых соединений железа и марганца и сужение отношения Ca/K.

В слабоокультуренных почвах, по сравнению с хорошо окультуренными, меньше биологическая активность и выделение углекислого газа. Компостирование почв в условиях избытка влаги приводит к падению Eh, некоторому повышению pH, увеличению содержания подвижных Fe, Mn, Al.

Окультуривание и внесение в обоснованных дозах минеральных удобрений, естественно, увеличивает и урожай сельскохозяйственных культур (таблица 3).

Таблица 3 - Урожай сельскохозяйственных культур на дерново-подзолистых почвах опытных полей кафедры растениеводства РГАУ-МСХА

Окультуренность	Удобрение	Пшеница яровая, ц/га	Овес, ц/га
ОК ₁	контроль	14,9	18,1
ОК ₃	контроль	34,2	24,3
	+ NPK на 3% ФАР	38,5	21,2

*) рекомендуемая доза на использование 2% ФАР составляла N₁₃₀P₁₂K₃₁; на использование 3% ФАР - N₁₆₃P₀K₇₈

При этом, в первую очередь, увеличивается урожай наиболее требовательных к плодородию почв культур (пшеницы). Избыток удобрений (на урожай при использовании 3% ФАР) без оптимизации других свойств почв

снижает эффективность удобрений.

С показателями рН и Еh тесно связана и биопродуктивность угодий, поступление энергии в почву и отчуждение ее с урожаем (таблица 4).

Таблица 4 - Накопление энергии в дерново-подзолистых почвах опытного поля кафедры растениеводства

Показатели	Почвы	
	ОК ₁	ОК ₃ + NPK
продуктивность, ц/га	16,2	37,8
энергоёмкость гумуса, млн.ккал/га	195-210	284-335
энергоёмкость почв, млн.ккал/га	352	517-563
поступление с послеуборочными остатками, кка/га	11,7	23,9-24,5

Окультуривание дерново-подзолистых почв и обоснованное внесение удобрений приводят не только к увеличению урожайности сельскохозяйственных культур, но к более экономичному расходованию влаги на единицу продукции.

Черноземы обыкновенные агроландшафта хозяйства «Заветы Ильича» Ленинградского района Краснодарского края характеризуются содержанием гумуса около 3,5%, подвижного фосфора 25 мг/кг, аммиачного азота 60 мг/кг, рН от 8 до 8,5. Урожайность зерна кукурузы в производственном опыте на площади 68 га составляла 70-75 ц/га. Урожайность (Y) зависела от содержания гумуса (Г), общего азота (N), подвижных форм Р₂О₅ (Р), пористости (П), коэффициента структурности (КС) и полной влагоемкости (ПВ):

$$Y = - 377,7 + 18,9 (Г) - 83,7 (N) + 0,23 (Р) - 2,0 (КС) + 13,2 (П) - 6,2 (ПВ),$$

$$r = 0,99; F = 19,2$$

В опытах Северо-Кубанской сельскохозяйственной станции эти почвы на начало третьей ротации севооборота характеризовались следующими агрохимическими показателями для слоя почвы 0-30 см: содержание гумуса - 3,7-4,1%, общего азота – 0,2-0,22%, валового фосфора – 0,16-0,19%, обменного калия - 386 мг/кг почвы, рН_{вод} - 8,27-8,30.

Внесение в почву биофильных элементов с пожнивными остатками

Исследования по учету накопления вегетативной массы корневых и пожнивных остатков бобовых, зерновых колосовых культур и сахарной свеклы в различных почвенно-климатических зонах страны свидетельствуют об их неравнозначности, как по количеству, так и по химическому составу, что подтвердили и результаты наших опытов. По накоплению биологической массы

пожнивных и корневых остатков предшественники озимой пшеницы распределялись в следующей последовательности: эспарцет, убираемый на семена – 6,4-8,5 т/га, озимая пшеница – 3,9-7,5 т/га, горох – 2,6-3,4 т/га и сахарная свекла – 2,1-3,1 т/га. Результаты по возвращению в почву органического вещества растений и основных элементов питания с пожнивно-корневыми остатками культур, предшествующих озимой пшенице представлены в таблице 5.

Таблица 5 - Возвращение в почву органического вещества растений и основных элементов питания с пожнивно-корневыми остатками культур, предшествующих озимой пшенице

Культура	Масса пожнивно-корневых остатков, т/га	Элементы питания, кг/га		
		азот	фосфор	калий
Эспарцет	6,4-8,5	63-94	28-32	94-127
Горох	2,6-3,4	44-58	9-22	56-84
Озимая Пшеница	3,9-7,5	25-53	10-16	55-92
Сахарная Свекла	2,1-3,1	36-79	6-13	64-82

Применение минеральных, органических, органоминеральных удобрений, стимуляторов роста растений способствует увеличению биомассы как надземной, так и корневой. В пожнивных остатках, соломе, костре и других растительных остатках, образующихся при выращивании сельскохозяйственных культур и при уборочных работах в растительной биомассе накапливается азот, фосфор и калий, а также другие макро- и микроэлементы. По нашим данным, например, при выращивании озимой пшеницы в виде соломы, пожнивных остатках, корневой системе общая биомасса в зависимости от урожайности может быть от 3 до 6 т/га и более. При этом в почву может быть возвращено от 20 до 60 кг азота, от 10 до 20 кг фосфора, от 50 до 100 кг калия и более. При этом, как следует из данных таблицы 68 после эспарцета в почву попадает в 1,2 - 2,8 раза больше азота, фосфора и калия. Такие же уровни NPK могут оставаться в почве после выращивания однолетних бобовых культур, например, гороха, а также сахарной свеклы.

С учетом севооборота, рационального применения органических и минеральных удобрений, регуляторов роста растений, пестицидов можно влиять на величину возмещения азота, фосфора и калия, других химических элементов, что может привести к росту показателей эффективного плодородия почвы, обогащая ее легкогидролизуемыми формами основных элементов питания. Об этом свидетельствует агрохимический анализ почвы, систематически неудобренных контрольных вариантов.

Представляет практический интерес оценка изменения содержания

элементов питания в почвах при внесении удобрений и выращивании сельскохозяйственных культур по сравнению с опытами без внесения удобрений.

В варианте систематически неудобряемых деленок содержание минерального азота в слое почвы 0-30 см на естественном фоне питания по предшественнику эспарцет было на уровне 10,1 мг/кг почвы, по остальным предшественникам на уровне 9,4-9,9 мг/кг почвы. На удобряемых вариантах содержание $N-NO_3 - N-NH_4$ относительно контрольных вариантов, где содержание его зависело от минерализации растительных остатков предшествующих культур и органического вещества почвы, увеличивалось от 0,3-2,0 до 11,4-14,3 мг/кг почвы или на 2,97-20,2% при минимальных дозах полного минерального удобрения и 21,3-44,4% - при внесении органоминеральных удобрений с использованием последействия 60 т/га навоза. Наиболее благоприятный режим азотного питания складывался по предшественникам - озимая пшеница и сахарная свекла, что обусловлено большим внесением азотных удобрений. Результаты по содержанию основных элементов питания под озимой пшеницей в период возобновления весенней вегетации при размещении по различным предшественникам представлены в таблице 6.

Из данных таблицы 6 следует, что применение соответствующих агротехнологий способствует увеличению в 2-3 раза содержания подвижных фосфатов в почвах в вариантах от низкой обеспеченности до средней и в 4-5 раз в варианте с высокой обеспеченностью. Аналогичная тенденция по увеличению содержания в почве наблюдается для обменного калия, достигая величины 445 мг/кг при использовании высоких доз азота, фосфора, калия и навоза.

Таблица 6 - Содержание основных элементов питания под озимой пшеницей в период возобновления весенней вегетации при размещении по различным предшественникам, мг/кг почвы

Вариант	Предшественник			
	Эспарцет	Горох	Озимая пшеница	Сахарная свекла
$N-NO_3 - N-NH_4$				
контроль, без удобрений	10.1	9.4	9.5	9.9
минимальная доза NPK	10,4	9,7	11,2	11,9
средняя доза NPK	12,1	11,4	11,8	12,5
высокая доза NPK	11,8	10,9	12,5	14,1
средняя доза NPK + последействие навоза	13,7	11,1	12,9	14,3

средняя доза NPK + последствие навоза и запашка урожая соломы	11,4	9,8	11,6	13,9
P₂O₅				
без удобрений	10,6	13,2	12,7	12,8
минимальная доза NPK	18,5	20,5	18,1	19,1
средняя доза NPK	26,3	31,9	24,9	29,5
высокая доза NPK	45,8	51,6	48,5	51,6
средняя доза NPK + последствие навоза	43,5	50,9	41,4	41,9
средняя доза NPK + последствие навоза и запашка урожая соломы	22,8	35,1	35,5	34,5
K₂O				
без удобрений	319,0	359,0	341,0	361,0
минимальная доза NPK	341,0	376,0	387,0	353,0
средняя доза NPK	376,0	377,0	390,0	373,0
высокая доза NPK	402,0	427,0	415,0	436,0
средняя доза NPK + последствие навоза	416,0	445,0	403,0	417,0
средняя доза NPK + последствие навоза и запашка урожая соломы	384,0	407,0	403,0	407,0

Влияние предшественников на урожай сельскохозяйственных культур, его качество и свойства почв, почвенное плодородие при использовании соответствующих агротехнологий, урожайность озимой пшеницы в среднем за 12 лет представлено в таблице 7.

Таблица 7 - Влияние предшественников и удобрений на урожайность озимой пшеницы, т/га

Вариант	Урожайность, т/га					
	Варьирование по годам	Среднее	Прибавка к контролю	Варьирование по годам	Среднее	Прибавка к контролю
Предшественник						
	Эспарцет			Горох		
1	3,49-6,58	4,93		2,64-6,25	4,16	
2	3,91-7,29	5,68	+0,75	2,72-7,17	5,11	+0,95
3	3,96-7,53	5,99	+1,06	3,3-7,19	5,52	+1,36
4	4,22-7,29	6,20	+1,27	4,49-7,25	5,96	+1,80
5	4,51-7,44	6,5	+1,57	4,23-7,45	5,83	+1,67
6	4,76-7,42	6,02	+1,09	5,41-7,42	5,88	+1,72

7	4,76-7,44	6,18	+1,25	4,37-7,03	5,57	+1,41
	Озимая пшеница			Сахарная свекла		
1	2,04-5,17	3,58		2,47-4,83	3,37	
2	2,88-4,51	4,51	+0,93	3,35-5,94	4,57	+1,20
3	4,11-5,15	5,15	+1,57	4,14-6,62	5,41	+2,04
4	4,45-5,62	5,62	+2,04	4,65-7,10	5,93	+2,56
5	5,01-6,50	5,63	+2,05	4,71-7,22	5,91	+2,54
6	5,18-6,57	5,75	+2,17	4,88-6,87	5,84	+2,47
7	5,01-6,07	5,24	+1,60	4,33-6,50	5,13	+1,76

В вариантах без удобрений урожайность озимой пшеницы в среднем за 12 лет составила: по предшественнику эспарцет – 4,39 т/га, по гороху – 4,16 т/га с варьированием по годам от 3,49 до 6,58 и 2,64 - 6,25 т/га. Средняя урожайность озимой пшеницы составила 3,6 т/га, сахарной свеклы - 3,4 т/га.

В случае предшественника гороха достоверно увеличение урожайности пшеницы, которое достигало до +0,67 т/га. Как следует из данных лучшим предшественником для озимой пшеницы является эспарцет, который при меньших в 2,5-3,0 раза затратах удобрений обеспечивает практически равный сбор зерна при размещении по сахарной свекле, но превосходит по урожайности колосовой предшественник.

Возможность управления продукционным процессом, обеспечивающим получение высоких урожаев зерна высокого качества, но с меньшими затратами имеет важное экономическое и экологическое значение. Это реально при совершенствовании севооборотов, чередовании сельскохозяйственных культур и применении инновационных агротехнологий возделывания озимой пшеницы с учетом экономического и биоэнергетического анализов.

Также необходимо проводить оценку окупаемости удобрений зерном. Предыдущие результаты показывают, что самая высокая окупаемость 1 кг д.в. удобрений отмечена по предшественнику - горох 11,8-28,7 кг/кг, самая низкая – 4,6-12,1 кг/кг - по озимой пшенице. Лучшие показатели – 15,0-31,7 и 11,1-28,7 кг/кг д.в. получены при использовании минимальных доз NPK и при органоминеральных системах, близкие – 8,72-22,66 кг/кг при средних дозах полного минерального удобрения.

Наряду с урожайностью, одним из требований к технологическим приемам выращивания является формирование белка и клейковины. Обладая высокой потенциальной продуктивностью и наследственными технологическими свойствами, сорта озимой пшеницы при выращивании в производственных условиях не всегда реализуют генетический потенциал качественных показателей. Основными факторами в получении высококачественного зерна

являются такие технологические приемы, как строгое чередование культур в севооборотах, подбор предшественников, применение удобрений, сбалансированных по основным элементам питания.

В проводимых нами исследованиях высевались сорта озимой пшеницы, по классификации, относящиеся к сильным и ценным сортам. Наряду с предшественниками, системой удобрений, на показатели качества зерна влияние оказывают и другие факторы, в большей степени гидротермические условия в период налив-созревание зерна. Вместе с этим анализ опытных данных показал неравнозначность предшественников и удобрений по накоплению клейковины и белка. Самое высокое содержание клейковины формировалось по предшественнику - эспарцет, о чем свидетельствуют данные систематически неудобряемого контрольного варианта – 24,8%, это выше, чем по другим предшественникам на 1,7-5,2% в абсолютном выражении или на 6,8-21,0% в относительном, минимальное содержание 19,6% при размещении по сахарной свекле.

Внесение минимальных доз ($N_{10}P_{20}$, $N_{30}P_{30}K_{30}$ и $N_{20}P_{30}K_{30}$) увеличивало данный показатель качества зерна на 0,3-1,5% в зависимости от предшественника. По мере возрастания применяемых доз минерального удобрения от минимальной до средней ($N_{20}P_{40}$, $N_{60}P_{60}K_{60}$ и $N_{40}P_{60}K_{60}$), содержание клейковины увеличивается от 0,2-0,7% по бобовым предшественникам, озимой пшенице и сахарной свекле. Интенсификация условий минерального питания, посредством увеличения в 2 раза от средней дозы ($N_{40}P_{80}$, $N_{120}P_{120}K_{120}$ и $N_{80}P_{120}K_{120}$) способствовала синтезу клейковины до уровня 25,2-27,8%, что по классификации соответствует категории ценной пшеницы. При органоминеральных системах по бобовым предшественникам и озимой пшенице формировалось зерно практически с равным содержанием клейковины 25,7-26,1 и 25,6-26,1%, по сахарной свекле на 1,7-2,7% меньше, что видимо, обусловлено меньшим количеством азотного удобрения в составе средней дозы NPK.

Наряду с содержанием клейковины, определяющей хлебопекарное качество муки, значимым показателем качества зерна является белок, количество которого в годы наших исследований варьировало в пределах 9,5-12,8%. Содержание белка было также дифференцированным относительно предшественников и фонов питания. Влияние предшественника на белковость зерна особенно четко прослеживается на неудобряемых контрольных вариантах: более высокая – 11,6% - отмечена по предшественнику - эспарцет, самая низкая - 9,5% - по сахарной свекле и практически равное - по предшественникам - озимая пшеница и горох. Данная закономерность прослеживалась по всем

изучаемым системам удобрения, увеличиваясь относительно контрольных вариантов от 0,3-1,0 – при минимальной дозе NPK до 0,8-2,6% - при средней, повышенной и высокой дозах полного минерального удобрения с варьированием в пределах 10,8-12,3, 12,1-12,8 и 11,9-12,8%

Минимальные показатели по всем вариантам опыта наблюдались по предшественнику - сахарная свекла. Из органоминеральных систем выделялся вариант с использованием последействия 60 т/га навоза, превосходивший вариант со средней дозой NPK на 0,3-0,7%.

Изменение эффективности применения минеральных удобрений на черноземах и дерново-подзолистых почвах при неоправданном увеличении их доз

Кислотно-основное и окислительно-восстановительное состояние почв существенно влияет на степень проявления в почвах закона «убывающего плодородия» (закона убывающей отдачи). Этот закон проявляется, как при уменьшении дохода на 1 руб. затрат при выращивании культур, так и по уменьшению содержания подвижных форм биофильных элементов в почвах при увеличении доз удобрений. Это подтверждается экспериментальными данными, рассчитанными для опытных полей и стационарных площадок РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева на дерново-подзолистых почвах Московской области, на опытных полях Северо-Кубанской опытной станции.

На среднеокультуренной дерново-подзолистой почве при прогнозе использования растениями 2% ФАР дозы удобрений составили 122 кг/га азота, 15,1 кг/га – фосфора, 95,2 кг/га – калия, а на усвоение 3% ФАР – 162,4 кг/га азота, 23,3 – фосфора, 128,5 кг/га калия.

Дозы удобрений, принятые в севообороте на обыкновенных черноземах Краснодарского края, составляли $N_{45}P_{50}K_{30,5}$ и $N_{85,6}P_{106}K_{71,2}$ при оценке влияния доз удобрений на проявление закона убывающей отдачи, и $N_{60}P_{60}K_{60}$ и $N_{120}P_{120}K_{120}$ – при оценке влияния предшественников на урожай.

Закон убывающего плодородия проявляется при применении возрастающих доз удобрений не только в снижении дохода на 1 рубль затрат, но и в уменьшении прироста содержания подвижных форм биофильных элементов на 100 кг внесенных удобрений.

В проведенных исследованиях показано, что закон убывающей отдачи проявляется и по увеличению подвижных форм биофильных элементов в почвах при увеличении доз удобрений (рис. 3).

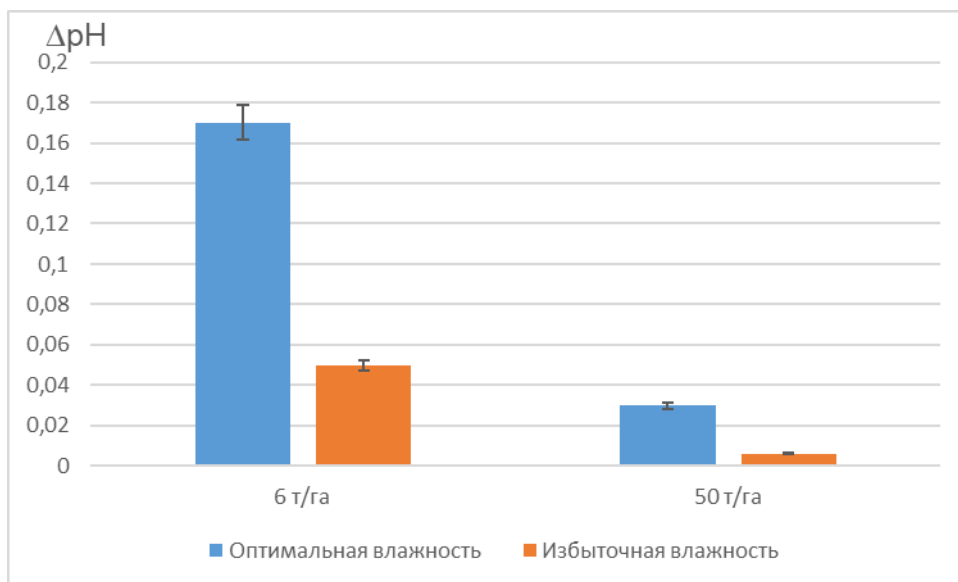


Рисунок 3 - Изменение pH в дерново-подзолистых почвах (площадка 2) при внесении 6 и 50 т/га¹ CaCO_3 (на 1 т CaCO_3)

Как видно из представленных данных, при внесении повышенных доз CaCO_3 положительный эффект от их действия ослабевает. Для дерново-подзолистых почв, по мере увеличения доз извести, возрастает величина общего сдвига pH , однако уменьшается сдвиг pH от 1 т извести.

При внесении повышенных доз азота и калия проявляется закон убывающей отдачи. Увеличение содержания подвижных фосфатов в почвах при внесении повышенных доз НРК, очевидно, обусловлено некоторым подкислением почв при внесении физиологически кислых удобрений.

Проявление закона убывающей отдачи при внесении повышенных доз удобрений на обыкновенных черноземах Краснодарского края под озимой пшеницей, где предшественником также была озимая пшеница, можно проиллюстрировать следующим образом. Содержание подвижных форм азота в контроле (без удобрений) меньше в среднем на 20%, чем при использовании $\text{N}_{30}\text{P}_{30}\text{K}_{30}$ и меньше на 30-35% в случае применения $\text{N}_{120}\text{P}_{120}\text{K}_{120}$. Содержание подвижных форм фосфора в контроле (без удобрений) меньше в среднем на 40-45%, чем при использовании $\text{N}_{30}\text{P}_{30}\text{K}_{30}$ и меньше в 3,8 раза в случае применения $\text{N}_{120}\text{P}_{120}\text{K}_{120}$. Содержание подвижных форм калия в контроле (без удобрений) меньше в среднем на 12-15%, чем при использовании $\text{N}_{30}\text{P}_{30}\text{K}_{30}$ и меньше на 20-23% в случае применения $\text{N}_{120}\text{P}_{120}\text{K}_{120}$.

В черноземах (в почвах с высокой емкостью поглощения) также проявляется закон убывающей отдачи; при внесении повышенных доз НРК на содержание их подвижных форм в почвах.

При повышении доз удобрений выше оптимума для каждой почвы и

культуры проявляется закон убывающей отдачи: уменьшается прирост урожая на 1 ц NPK, на 1 рубль затрат. В то же время, одновременно происходят изменения и свойств почв. При этом проявляются 2 противоположные тенденции. С увеличением доз удобрений увеличивается их миграция в воду, испарение из почв. Это приводит к увеличению степени проявления закона убывающей отдачи.

При умеренных дозах удобрений увеличивается содержание в почве водорастворимых подвижных форм биофильных элементов. Однако при неоправданно высоких дозах для одних почв ярче проявляется неблагоприятное изменение других свойств почв (рН, Eh и т.д.), в реакцию вступают более труднодоступные сорбционные места почвенного поглощающего комплекса, что уменьшает долю подвижных форм биофильных элементов в почвах. При заполнении всех сорбционных мест резко увеличивается ионная сила почвенных растворов, появляются токсичные концентрации ряда элементов. В конечном итоге, закон убывающей отдачи проявляется и на плодородии почв.

Кисотно-основное и окислительно-восстановительное состояние почв определяет групповой и фракционный состав гумуса при наличии прямых и обратных, в т.ч. последовательных связей. Повышенные дозы удобрений изменяют кислотно-основное и окислительно-восстановительное состояние почв, содержание, групповой и фракционный состав гумуса.

При увеличении степени окультуренности почв и при внесении удобрений возрастает содержание углерода, отношение Сгк:Сфк и соответственно урожай.

Величина $pH_{КС1}$ слабоокультуренной почвы равнялась 4,3, хорошо окультуренной – 5,9. Окислительно-восстановительный потенциал равнялся для удобренной почвы 590 мВ, для неудобренной – 618 мВ. Это подтверждает известное положение о том, что при кислой реакции среды отношение Сгк:Сфк уменьшается. Аналогичная реакция отмечается в щелочной среде, при оглеении, т.е. при низком значении Eh. Увеличение содержания гумуса и отношения Сгк/Сфк приводит к образованию агрономически ценной структуры почв.

Кислотно-основное и окислительно-восстановительное состояние почв и образование агрономически ценной структуры

Окислительно-восстановительный потенциал отличается на поверхности и внутри структурных отдельностей, в более крупных агрегатах и в более мелких. Так, по полученным нами данным, в структурных отдельностях 5-3 мм пахотного горизонта дерново-подзолистых почв Eh составлял для удобренной и неудобренной среднеокультуренной почвы соответственно 618 и 630 мВ, а для

агрегатов < 0,25 мм соответственно 410 и 495 мВ. В слабоокультуренной дерново-подзолистой почве содержание агрегатов > 3 мм в % составляло 0,11%, а в хорошо окультуренной – 0,58%. Внесение в почвы минеральных удобрений значительно повысило в них содержание агрегатов > 3 мм: в среднеокультуренных почвах – от 0 до 3,9%. В хорошо окультуренных – от 0,6 до 26,0%. Однако в большей степени повысило содержание агрегатов > 3 мм внесение пожнивных остатков пшеницы 30 г/кг почв: в среднеокультуренных почвах при малой и средней дозе NPK – от 15,7 до 19,2%, а в хорошо окультуренных – от 10,0 до 42,4%.

В обыкновенных черноземах структурное состояние почв (Y) также в значительной степени зависит от содержания органического вещества (Г) и в меньшей степени от рН и содержания подвижных форм P_2O_5 .

$$Y = -0,99 + 0,68Г + 0,08рН + 0,01P_2O_5$$

$$r = 0,69; F = 4,3.$$

Внесение в почву навоза и сложного органо-минерального компоста привело к увеличению содержания агрегатов 2-1 мм от 15,5 до 16,8 и 18,8%, агрегатов 1-0,5 мм – от 11,6 до 13,0 и 15,0%. Это соответствует установленной структурообразующей и комплексообразующей способности органических веществ.

Кислотно-основное и окислительно-восстановительное состояние почв определяет плодородие почв и урожай сельскохозяйственных культур. Однако при интенсификации сельскохозяйственного производства также проявляется закон «убывающей отдачи».

Таким образом, закон убывающей отдачи или закон убывающего плодородия проявляется в системе почва-растение при увеличении доз удобрений. Степень его проявления идентифицируется по изменению содержания в почвах биофильных элементов, гумуса, структурного состояния почв на 100 кг д.в. внесенных удобрений, по изменению рН на 1 т $CaCO_3$, по изменению биопродуктивности угодий, биохимического состава растений, по накоплению энергии в почве и в урожае сельскохозяйственных культур на 100 кг д.в. вносимых удобрений.

Степень проявления закона отличается в разных интервалах доз удобрений и почвах разной степени окультуренности, под отдельными культурами и зависит от предшественников в севообороте. Степень проявления закона убывающей отдачи в почвах характеризует генезис и плодородие почв, их балл, экономическую оценку, рациональные уровни химизации для конкретных почв и систем земледелия.

Кисотно-основное и окислительно-восстановительное состояние системы почва-растение, как интегральный показатель, характеризующий состояние и развитие почв

В проведенных исследованиях показана перспективность оценки кислотно-основного и окислительно-восстановительного состояния почв по свойствам, процессам и режимам.

Кислотно-основные и окислительно-восстановительные свойства почв характеризуются фракционным составом кислотно-основных и окислительно-восстановительных систем, буферной емкостью в кислотно-основном и окислительно-восстановительном интервале, содержанием в почве положительно и отрицательно заряженных соединений, определяющих рН и E_h почв, скоростью процессов, депонирующей способностью почв.

Разные типы почв отличаются содержанием функциональных групп, определяющих кислотно-основные свойства почв в кислом и щелочном интервалах. Это карбоксильные, спиртовые, фенольные группы органических веществ, группировки H^+ , OH^- на плоскостях и гранях минералов, наличие соединений, обладающих кислыми и основными свойствами в растворах и т.д. Эти функциональные группы имеют разные константы диссоциации, и их содержание в определенных типах почв и горизонтах неодинаково.

В связи с указанным, одни почвы больше буферят в разных интервалах рН. Проведя потенциометрическое титрование почв, мы определяем pK_a функциональных групп ППК и количество титранта, пошедшее на их оттитровку (фракционный состав кислотно-основных систем).

Для оттитровки разных функциональных групп с установленной величиной pK_a в отдельных почвах и горизонтах требуется и определенной количество титранта, что необходимо учитывать при расчете доз извести с целью доведения рН почв до заданных значений.

В проведенных исследованиях показана перспективность оценки окислительно-восстановительной емкости почв окислительно-восстановительным титрованием окислителями, восстановителями и с использованием потенциостатической кулонометрии на электродах из почвенно-угольной пасты.

В черноземе, по сравнению с дерново-подзолистой почвой, количество окисляющихся и восстанавливающихся соединений значительно больше. Их количество увеличивается в почве избыточного увлажнения.

По полученным данным, окислительно-восстановительная емкость почв коррелирует с содержанием в почвах оксидантов и антиоксидантов. Так, содержание антиоксидантов (в мкг на 1 г в пересчете на кверцетин) составило в

почвенном растворе дерново-подзолистых почв оптимального увлажнения $2,9 \pm 0,2$, а в почве избыточного увлажнения – $5,5 \pm 0,3$; в черноземе обыкновенном соответственно $0,8 \pm 0,1$ и $2,3 \pm 0,2$; в лугово-черноземной почве – $2,7 \pm 0,2$ и $6,1 \pm 0,3$.

Представленные результаты позволяют рекомендовать возможность оценки концентраций подвижных форм биофильных элементов в почвах на единицу плотности заряда ацидоидов и базоидов (таблица 8).

*Таблица 8 – Концентрация подвижного фосфора и обменного калия в почвах в расчете на единицу плотности заряда *, а · 10², (Ап – 0-24)*

Параметр	Чернозем выщелоченный		Дерново-подзолистая почва	
	P ₂ O ₅	K ₂ O	P ₂ O ₅	K ₂ O
на 1 м ² общей удельной поверхности, мг/м ²	0,05	0,28	0,3	0,6
на 1 м ² внешней удельной поверхности	0,16	0,81	0,8	1,7
на единицу плотности заряда, мг/мг-экв на 1м ² 1	-	96,7	-	34,2
2		65,2	-	31,9
3	25,2	-	21,4	-

*) 1 – с учетом емкости поглощения катионов; 2 – с учетом заряда ацидоидов; 3 – с учетом заряда базоидов

удельная поверхность рассчитана на максимальную гигроскопию;

P₂O₅ – по Кирсанову, K₂O – в вытяжке CH₃COONH₄

Рассчитанная плотность заряда составила для чернозема и дерново-подзолистой почвы соответственно $3,1 \cdot 10^{-3}$ и $5,4 \cdot 10^{-3}$ на 1 м² общей удельной поверхности. С учетом заряда ацидоида – $4,6 \cdot 10^{-3}$ и $5,8 \cdot 10^{-3}$, с учетом заряда базоида – $2,3 \cdot 10^{-3}$ и $4,2 \cdot 10^{-3}$.

Выводы

1. Предлагается интегральная оценка ОВ и кислотно-основного состояния почв, включающая характеристику их свойств, процессов и режимов, состояние растений и микрофлоры.

2. Показана возможность и перспективность интегральной оценки по трансформации, миграции и аккумуляции вещества, энергии и информации.

3. Данные длительных полевых опытов показали, что при оптимальных значениях pH и Eh на дерново-подзолистых среднесуглинистых почвах, по сравнению со слабоокультуренными почвами, урожайность зерновых возросла с 16,2 до 37,8 ц/га, энергоемкость гумуса – от 195-260 до 284-335 млн. ккал га⁻¹, энергоемкость почв – с 352 до 517-563 млн. ккал га⁻¹, оптимизированы взаимосвязи pH, Eh и содержания подвижных форм биофильных элементов в

почвах.

На обыкновенных черноземах при оптимизации свойств почв урожайность озимой пшеницы возросла с 35 ц г⁻¹а до 57 ц га⁻¹.

4. Выращивание озимой пшеницы по предшественнику – эспарцету и внесение NPK совместно с навозом повысило урожай пшеницы до 65 ц га⁻¹.

5. При увеличении доз удобрений, но без существенного изменения водно-физических свойств почв проявляется закон «убывающей отдачи».

8.4 Взаимосвязь кислотно-основных и окислительно-восстановительных режимов почв

Кисотно-основное и окислительно-восстановительное состояние почв характеризуется свойствами, процессами и режимами.

Кисотно-основные режимы в почвах определяются закономерным изменением кислотно-основных свойств и процессов во времени и в пространстве.

Существует ряд причин, вызывающих подкисление почв, при действии которых на объект проявляются эффекты синергизма и антагонизма. К основным причинам относятся: 1) кислые осадки; 2) влияние на почву кислых водорастворимых продуктов разлагающихся растительного опада; 3) оглеение при промывном типе водного режима и временное избыточное увлажнение почв; 4) несбалансированное применение физиологически кислых удобрений: (NH₄)SO₄; KNO₃, K₂SO₄; 5) особенности сорбционных свойств корневых систем развивающихся на почвах растений – обмен Ca, Mg, K из почв на H⁺, выделяемые растениями; 6) недостаток Ca, Mg, K и т.д. в почвах и постепенное обеднение почв ими; 7) стекание по стволу и листьям (хвое) кислых продуктов; 8) загрязнение тяжелыми металлами, избыточное увлажнение почв и ряд других факторов деградации почв, приводящих к преимущественному развитию грибной микрофлоры и большему образованию кислых низкомолекулярных органических соединений.

Синергизм проявляется в усилении подзолообразования при развитии оподзоливания и временного анаэробнозиса. Антагонизм проявляется при одновременном развитии подзолообразования и дернового процесса.

Развитие процессов зависит от гранулометрического, минералогического, химического состава пород и почв, влажности, температуры, биопродуктивности угодий, биохимического состава опада, расположения почв по рельефу, формы склонов.

При этом процесс подзолообразования протекает локально во времени и в пространстве. Весной и осенью преобладает промывной тип водного режима, летом – часто выпотной. Растворы часто движутся и в горизонтальном

направлении от микрозон разного гранулометрического состава, увлажнения, температуры, гумусированности, уплотнения и т.д.

Кислые растворы, образовавшиеся при разложении растительных остатков, движутся вниз по профилю, и при этом растворы из A_0 действуют на A_1 , A_2 , B и т.д. Одновременно на нижележащие горизонты влияют все растворы вышележащих слоев, а при выпотном типе водного режима (летом и зимой при очень низких температурах) – наоборот, т.е. проявляется последовательное влияние друг на друга.

Последовательно изменяются и свойства почв: pH, микробиологическая активность, Eh, содержание водорастворимых Fe, Mn, Al, содержание NO_3 , водорастворимых фосфатов. При этом проявляется последовательная корреляция, прямые и обратные связи, развитие процессов происходит при определенных пороговых значениях воздействующих на почву внешних факторов (фракталов), зависит от скорости и продолжительности воздействия. Так, например, в окультуренных почвах северной и средней (в меньшей степени) южной тайги увеличено содержание гумуса. Однако это приводит к росту микробиологической активности и при временном переувлажнении к увеличению мощности оглеенного горизонта, но к большей глубине его распространения. Большее содержание гумуса при $C_{гк}:C_{фк} < 0,7$ приводит к увеличению количества мигрирующих вниз фульвокислот и низкомолекулярных кислот и к более интенсивному развитию подзолообразования, но на большей глубине.

Развитие подзолообразования определяется и информационно-энергетическими параметрами компонентов ландшафта. На вогнутых склонах этот процесс развит сильнее, его развитие отличается на склонах северной и южной экспозиции. Развитие процесса определяется условиями термодинамического равновесия почв с факторами почвообразования - уменьшением свободной энергии, $-\Delta G$, увеличением энтропии $+\Delta S$.

Кисотно-основные свойства и режимы почв

Кисотно-основные свойства почв характеризуются в основном следующими показателями: 1) pH_{H_2O} ; 2) pH_{CaCl_2} ; 3) pH_{KCl} ; 4) обменной кислотностью; 5) гидролитической кислотностью; 6) $pH_{H_2O} - pH_{KCl}$; 7) фракционным составом кисотно-основных систем – количеством H^+ , OH^- в разных интервалах pH: 2,0-4,0; 4,0-5,5; 5,5-7,0; 7,0-8,0; 8,0-10,0; 8) в разных интервалах pK_a – от 1 до 10 ($pK_a = -\lg K_a$); 9) содержанием положительно и отрицательно заряженных соединений, обладающих кисотно-основными свойствами.

Для характеристики кисотно-основных процессов в почвах используют

константы скоростей реакций сорбции и десорбции катионов водорода и анионов гидроксила почвой; оценку депонирующей способности почв к кислым и основным компонентам; показатель буферности почв к изменению pH и содержания кислотно-основных систем в сезонной динамике в зависимости от влажности и температуры; буферную емкость почв к кислотно-основным компонентам; буферную емкость к физиологически кислым и физиологически щелочным удобрениям, мелиорантам типа сульфата и карбоната кальция; величину отношения $\Delta Eh/\Delta pH$; электрокинетический потенциал; суспензионный эффект; характеристику протонного барьера у растений; величину отношения $\Delta X/\Delta pH$, где X – содержание подвижных форм P_2O_5 , K_2O , Fe, Mn, Zn и т.д.; величину отношения $\Delta X/\Delta pH$ и ΔEh .

Кислотно-основные режимы почв

Кислотно-основные режимы почв характеризуются изменением кислотно-основных свойств почв и процессов во времени и в пространстве.

Свойства и процессы почв постоянно изменяются во времени. Динамику и величину параметров в этом случае оценивают: 1) явлениями гистерезиса; 2) изменениями в сезонной динамике; 3) изменениями в годовых циклах; 4) изменениями в многолетних циклах; 5) взаимовлиянием горизонтов почв. Эти показатели обусловлены сукцессиями растительности, микробиологической активности и почв.

При изменении свойств и процессов почв в пространстве они оцениваются: 1) по профилю почв; 2) в катене; 3) в вертикальной зональности почв; 4) в ландшафте; 5) в структуре почвенного покрова с учетом микрорельефа (с учетом асимметрии и эксцесса); 6) в прикорневой зоне растений; 7) в слоях и гранях структурных отдельностей; 8) в парцелле.

Кислотно-основные режимы почв отличаются для основных типов почв: подзолистых, дерново-подзолистых, болотных, аллювиальных, серых лесных, черноземов, солончаков, солонцов, каштановых почв, сероземов и т.д. Они отличаются для основных кор выветривания, на кислых, основных и засоленных породах. Дополнительно кислотно-основные режимы почв характеризуются определенными математическими закономерностями изменения кислотно-основных компонентов по почвенному профилю.

С нашей точки зрения, кислотно-основные свойства почв необходимо учитывать при экстенсивном ведении сельскохозяйственного производства и слабой степени проявления процессов деградации почв. Кислотно-основные процессы почв необходимо учитывать при интенсивном ведении сельскохозяйственного производства и средней степени проявления процессов деградации почв. Кислотно-основные режимы почв необходимо учитывать и при

очень интенсивном ведении сельскохозяйственного производства, при высокой степени загрязнения почв, при наличии жестких экологических и экономических ограничений использования почв, при составлении прогнозов состояния почв и компонентов ландшафта на перспективу.

Ниже представлены выделенные нами кислотно-основные режимы почв сельскохозяйственного использования.

Кислотно-основные режимы почв сельскохозяйственного использования соответствуют разным иерархическим уровням, например: 1 – кислотный; 2 – нейтральный; 3 – щелочной. На более низких иерархических уровнях эти типы кислотно-основных режимов подразделяются на следующие: 1) промывной, непромывной, выпотной, криогенный; 2) аккумулятивный, элювиально-иллювиальный, с равномерным распределением кислотно-основных компонентов по почвенному профилю; 3) аэробный, анаэробный, переменный по кислотности; 4) засоленный, незасоленный.

На следующих стадиях идентификации кислотно-основные режимы почв подразделяются: а) для разных кор выветривания; б) для разного гранулометрического состава; в) для разного минералогического состава.

Особенности использования почв с разными кислотно-основными режимами определяются взаимосвязями их с другими режимами (водным, тепловым, окислительно-восстановительным, фосфатным, азотным и т.д.).

Свойства, процессы, режимы окислительно-восстановительного состояния почв

Окислительно-восстановительные свойства почв

Окислительно-восстановительные свойства почв характеризуются величинами окислительно-восстановительного потенциала, rH_2 , pH, буферной емкостью почв в окислительно-восстановительном интервале, фракционным составом ОВ систем, содержанием в почве оксидантов и антиоксидантов, положительно и отрицательно заряженных комплексных соединений ионов, суспензионным эффектом по величине Eh, энергетической оценкой ОВ состояния по данным газоразрядной визуализации.

Окислительно-восстановительные процессы в почвах определяются буферностью почв в окислительно-восстановительном интервале, при этом оценивают изменение окислительно-восстановительного потенциала от влажности, температуры, концентрации углекислого газа; кинетикой процессов окисления и восстановления; гистерезисом окислительно-восстановительного состояния почв и параметров, с ним взаимосвязанных; взаимосвязями pH, Eh и свойств почв ($\Delta Eh/\Delta pH$; $\Delta Eh/\Delta W$; $\Delta Eh/\Delta t^0$; $\Delta Eh/\Delta W, \Delta t, \Delta t^0$; $\Delta Y/\Delta Eh$; $\Delta Y/\Delta Eh, \Delta pH$; изменением Eh и показателей, его определяющих, в разных слоях

и гранях структурных отдельностей, в отдельных горизонтах, в структуре почвенного покрова, в изменениях E_h при внесении удобрений и мелиорантов, изменением окислительно-восстановительных свойств почв при их сельскохозяйственном использовании и антропогенном воздействии.

Окислительно-восстановительные процессы в почвах также идентифицируются по содержанию положительно и отрицательно заряженных аэроионов в испарениях из почв и растений, оцениваются по химическому составу почвенных растворов с учетом сезонной динамики. Каждый окислительно-восстановительный процесс в почвах сопровождается изменением термодинамических характеристик, выделением или поглощением энергии в сорбционных и десорбционных процессах в почвах, в системе почва-растение, трансформации и массопереносу ионов, комплексных соединений, изменению энергетических характеристик на геохимических барьерах почвенного профиля. Очевидно, наряду с протонным барьером в растениях, существуют окислительно-восстановительные барьеры в почвах, растениях и микроорганизмах.

Окислительно-восстановительные процессы характеризуют последовательное протекание реакций в почве, гистерезис, локальное изменение их во времени и в пространстве. ОВП в почвах характеризуются и последовательным влиянием E_h на свойства почв, на микробиологическую активность, содержание подвижных форм Fe^{2+} , Mn^{2+} , NO_3 , NH_4 , NH_3 , на содержание подвижных фосфатов и т.д.

При этом величина E_h определяется рядом независимых переменных: влажностью, температурой, pCO_2 , поступлением в почву органических остатков, микробиологической активностью и т.д. Влияние указанных независимых переменных на E_h зависит от массы (X), веса влияния (K), продолжительности влияния (t) $E_h = \sum K_i X_i^n t$ на разном иерархическом уровне.

Важное практическое значение имеет скорость ответных реакций почвы на внешние воздействия, проявление гистерезиса, число передатчиков влияния E_h на отдельные свойства почв.

Протекающие в почве процессы взаимно связанные с окислительно-восстановительным состоянием почв определяют процессы миграции ионов в почвах, образование и разрушение структуры почв, гумуса, почвенных пор, изменение химического состава граней и слоев структурных отдельностей. Они связаны и с локальным протеканием в почве почвообразовательных процессов во времени и в пространстве.

Информационная оценка окислительно-восстановительного состояния почв

Информационная оценка окислительно-восстановительного состояния почв обусловлена взаимосвязями Eh и свойств почв; Eh, свойств почв и биопродуктивности угодий, характером сельскохозяйственного использования, особенностями составляющих систем земледелия, экономической эффективностью сельскохозяйственного использования, степенью проявления закона «убывающей отдачи».

С нашей точки зрения, важное агроэкологическое значение имеет оценка взаимосвязей свойств почв (Y) от pH и Eh среды:

$$Y = \Sigma K_1 pH + K_2 Eh.$$

Энергетическая оценка окислительно-восстановительного состояния почв характеризуется: 1) фракционным составом ОВ систем, 2) содержанием в почвенных растворах оксидантов и антиоксидантов; 3) содержанием в почве положительно и отрицательно заряженных соединений; 4) аэроионов; 5) окислительно-восстановительным потенциалом, показателем gH_2 ; 6) изменением энергии при окислении и восстановлении компонентов почв в процессах ионного обмена, комплексообразования, растворения осадков; 7) энергетической оценкой плодородия почв; 8) балансом энергии в компонентах системы почва-растение, в т.ч. при получении урожаев.

Энергетическая оценка ОВ состояния почв характеризуется поглощением почвой энергии, ее трансформацией, миграцией, аккумуляцией, использованием энергии для эволюции почв, создания плодородия почв, для повышения урожая сельскохозяйственных культур. Во всех случаях учитываются величины КПД этих процессов. В сочетании с Eh необходим прогноз образования и растворения осадков, образования и разрушения комплексов, протекания реакций ионного обмена, миграции, трансформации и т.д.

При рассмотрении почвенных и почвообразовательных процессов, с нашей точки зрения, целесообразно учитывать их локальность во времени и в пространстве, совместимость последовательность действия на почву. Важное практическое значение имеют интенсивность действия, скорость действия, продолжительность действия, степень обратимости.

Для углубленной характеристики протекающих в почвах почвообразовательных процессов рассматривают типы температурного, водного, кислотно-основного, окислительно-восстановительного и других режимов почв. Однако они должны рассматриваться на разном иерархическом уровне во времени и в пространстве.

Интенсивность и скорость протекающих почвообразовательных процессов

отличаются, как в разные сезоны года, так и в течение ряда лет, при эволюции почв из одной стадии развития в другую. При действии почвообразовательных процессов на почву и породу проявляются эффекты синергизма и антагонизма. Так, подзолообразование усиливается при временном развитии оглеения, чаще в весенний период и ослабляется при развитии дернового процесса почвообразования, т.е. летом и осенью. Эти явления в разной степени выражены в порах и трещинах, на поверхности и внутри структурных отдельностей.

Важное значение для оценки эволюции почв имеет оценка гистерезиса физико-химических, агрохимических, водно-физических свойств почв (статического и динамического). При этом, по полученным нами данным, и гистерезис прослеживается не только в годовых и сезонных циклах, но и в изменении свойств почв в течение суток, при изменении давления, влажности и температуры воздуха. Степень разомкнутости петли гистерезиса характеризовала степень нестационарности состояния почв, величину необратимых изменений, степень эволюции. Эта величина, например, была больше в пахотных дерново-подзолистых почвах, по сравнению с целинными.

Изменение свойств почв во времени характеризуется кинетикой процессов (внешнедиффузионной, внутридиффузионной и химической разных порядков). Однако определенной скоростью характеризуются не только химические реакции, но и изменение водно-физических свойств почв, поглощение растениями элементов питания, все почвообразовательные процессы. Практическая задача состоит в целенаправленном регулировании скорости этих процессов.

Важное агроэкологическое значение имеет поэтапное изменение свойств почв под влиянием естественных и антропогенных факторов и поэтапная смена протекающих процессов.

Регулирование скорости и интенсивности протекающих почвообразовательных процессов позволяет повысить эффективность ведения сельскохозяйственного производства. Так, по полученным нами данным, увеличение интенсивности развития дернового процесса почвообразования на дерново-подзолистых почвах позволила получить урожай зерна 50-60 ц/га без внесения извести в течение 40 лет и при отрицательном балансе в севообороте по подвижным формам фосфора и обменного калия.

Таким образом, с нашей точки зрения, необходимо рассматривать факторы почвообразования и почвенные режимы на разном иерархическом уровне. Их совокупность, скорость и интенсивность изменяются локально во времени и в пространстве.

Важное практическое значение имеет разработка способов регулирования

скорости и интенсивности протекания в почвах почвообразовательных процессов.

Выводы

1. Целесообразна характеристика кислотно-основного и окислительно-восстановительного состояния почв с оценкой кислотно-основных и окислительно-восстановительных свойств, процессов и режимов почв. Режимы характеризуются закономерным изменением свойств и процессов во времени и в пространстве.

2. На основании изложенных в предыдущих главах диссертации данных обосновывается информативность использования дополнительных методов изучения кислотно-основных и окислительно-восстановительных свойств почв.

3. Регулирование скорости и интенсивности протекания в почвах кислотно-основных и окислительно-восстановительных режимов почв является одним из перспективных приемов повышения плодородия почв и биопродуктивности сельскохозяйственных угодий.

Влияние окислительно-восстановительного и кислотно-основного состояния почв на их структурное состояние

Кислая реакция среды, промывной тип водного режима, как и щелочная реакция среды, приводят к уменьшению содержания гумуса в почвах, сужению отношения $S_{гк}:S_{фк}$ меньше единицы. Как низкие, так и высокие значения Eh почв также приводят к уменьшению накопления гумуса и к ухудшению структурного состояния почв. Это отмечается и при кислой, и при щелочной реакциях среды.

В таблице 9 представлены данные модельного опыта по изменению структурного состояния изучаемых почв от pH и Eh среды.

Таблица 9 - Изменение структуры почв в зависимости от pH и Eh среды

Почва	pH	Eh	Содержание частиц, г			
			< 0,05 мм	< 0,01 мм	< 0,005 мм	< 0,001 мм
дерново-подзолистая	5,7	146	0,2079	0,0177	0,0063	0,0009
	6,9	159	0,0451	0,0142	0,0050	0,0074
	7,2	170	0,1293	0,0312	0,0143	0,0089
	9,5	180	0,0310	0,0071	0,0006	0,0083
чернозем	6,5	153	0,1381	0,0898	0,0527	0,0110
	7,1	150	0,2222	0,1078	0,0609	0,0207
	7,7	-175	0,2330	0,1372	0,0592	0,0144
	10,4	-129	0,1417	0,0457	0,0244	0,0104

*) $pH(H_2O)$; Eh в мВ по ХСЭ

Как видно из представленных данных, минимальное содержание илистой

фракции отмечается в дерново-подзолистой почве при $pH = 5,7$, при увеличении дозы $Ca(OH)_2$ диспергирование возрастает. Минимальное содержание илистой фракции в черноземе наблюдается при $pH = 6,5$, а при добавлении гидроксида кальция – диспергирование растет. (Уменьшение дисперсности при $pH = 10,4$ требует дальнейшего изучения). В данном случае изменение дисперсности связано с коагуляцией почвенных частиц, но не с образованием макро- и микроструктуры.

Изменение содержания частиц $> 0,05$ мм свидетельствует в определенной степени об образовании более крупных частиц, в т.ч. и микроструктуры. Судя по полученным данным, большее образование таких частиц происходит в дерново-подзолистой почве при ее известковании до $pH = 9,5$, в черноземе большая агрегация наблюдается при $pH = 6,5$, что соответствует теоретическим закономерностям и при $pH = 10,4$, что требует дальнейшего выяснения.

С нашей точки зрения, полученные результаты показывают возможность оценки оптимума pH в почве с учетом влияния pH на структуру по предлагаемой методике.

Развитие почвообразовательных процессов при разных значениях pH и Eh среды сказывается как на формировании почвенного профиля, так и на совокупности агрохимических, физико-химических, водно-физических свойств почв. В первую очередь, эти процессы затрагивают внешние слои структурных отдельностей.

Окультуривание дерново-подзолистых почв, сопровождающееся нейтрализацией среды и оптимизацией их кислотно-основного состояния, приводит к изменению состава внешних и внутренних слоев структурных отдельностей. При окультуривании почв оптимизируется как кислотно-основное, так и ОВ состояние. В дерново-подзолистых почвах это сопровождается увеличением отличия между внешними и внутренними частями призматических структурных отдельностей гор. A_2B и B .

В проведенных нами исследованиях оценивалось содержание элементов, величина pH и снимались термограммы почв в призматических структурных отдельностях горизонтов дерново-подзолистой почвы контроля и хорошо окультуренной почвы опытного поля кафедры растениеводства РГАУ-МСХА имени К.А Тимирязева. В слабоокультуренной почве внешние слои структурных отдельностей более кислые, в них меньше подвижных форм Ca , Mg , K . В хорошо окультуренных почвах отмечается противоположная зависимость.

Как видно из представленных графиков, в слабоокультуренной почве, по сравнению с хорошо окультуренной, в $A_{п}$ меньше буферная емкость в кислом интервале, но больше – в щелочном интервале.

Внешняя часть структурных отдельностей слабоокультуренной (более кислой) почвы меньше буферит, по сравнению с внутренней частью отдельности, в кислом интервале, но больше – в щелочном. В хорошо окультуренной почве внешняя часть структурных отдельностей больше буферит в кислом интервале, по сравнению с внутренней частью. Инфракрасные спектры хорошо и слабоокультуренной почвы также отличаются для внешних и внутренних частей структурных отдельностей.

Почвы разной степени окультуренности и их внешние и внутренние слои структурных отдельностей отличаются и по взаимосвязям pH и Eh. Применение органико-минеральных компостов приводит к оструктурированию почв. Это сопровождается и улучшением водно-физических свойств почв.

Так, по полученным нами данным, при внесении в почвы сложного компоста из фосфогипса, органических остатков, полуперепревшего навоза крупного рогатого скота, пожнивных остатков существенно увеличивалось как содержание в почве агрегатов $> 0,2$ мм, так и повышался коэффициент структурности почв.

Структурное состояние почв, обработка почв различными агрегатами в конечном итоге влияют на урожай сельскохозяйственных культур. Наибольшее положительное влияние на оструктурированность почв оказало чередование отвальных и безотвальных обработок с добавлением 40 т/га навоза за ротацию севооборота и заплата соломы. С нашей точки зрения, это обусловлено усилением процессов комплексообразования.

Выводы

1. Окислительно-восстановительное и кислотнo-основное состояние почв в значительной степени определяют структурное состояние почв, оптимальные значения pH и Eh, увеличивают коэффициент структурности почв.

2. Процессы комплексообразования, протекающие в почвах при внесении органических удобрений, способствуют оптимизации структурного состояния почв.

Экономическая оценка окислительно-восстановительного и кислотнo-основного состояния в системе почва-растение

Оптимизация кислотнo-основного и окислительно-восстановительного состояния почв приводит к увеличению отношения C_{гк}:C_{фк}, содержания гумуса, к увеличению емкости поглощения почв и, как следствие, к увеличению содержания в почве подвижного фосфора, обменного калия, подвижных форм азота.

Как следствие оптимизации свойств почв, происходит увеличение урожайности сельскохозяйственных культур, уменьшение риска падения урожая

при неблагоприятных погодных условиях, снижение степени проявления закона «убывающей отдачи», на неокультуренной дерново-подзолистой почве, на почве среднего плодородия без внесения удобрений и на хорошо окультуренной почве с внесением удобрений на использование растениями 2% ФАР урожай озимой пшеницы в среднем составлял соответственно 14,9; 34,9 и 38,8 ц/га. Рекомендованная доза удобрений на 2% ФАР составляла $N_{136}P_{12}K_{31}$.

Риск падения урожая озимой пшеницы при неблагоприятных погодных условиях составлял на слабоокультуренной почве 99%, на хорошо окультуренной с внесением удобрений – 96,7%, для трав 2-го года использования соответственно 76,6 и 62,1%.

На обыкновенном черноземе в производственном опыте ОАО «Заветы Ильича» урожайность зерна кукурузы составляла 71,0 ц/га. Если вносили полуперепревший навоз, то урожайность составляла 79 ц/га, если сложный компост – 95 ц/га. В многолетних опытах Северо-Кубанской сельскохозяйственной опытной станции урожайность озимой пшеницы составляла в среднем за 30 лет в контроле – 22,4 ц/га, при внесении $N_{45}P_{53}K_{36}$ – 48,3 ц/га, при внесении дополнительно 12 т/га навоза – 50,0 ц/га. Для сахарной свеклы эти показатели были соответственно 30,1, 45,2 и 45,7 т/га. При этом увеличение доз удобрений в принятых границах (до $N_{90}P_{100}K_{70}$) приводило к увеличению содержания в почве подвижного фосфора, обменного калия и $N-NO_3 + N-NH_4$.

Повышение урожая и содержания биофильных элементов в почвах зависело от предшественников и обработки почв. В большей степени повышение плодородия отмечалось при чередовании отвальных и безотвальных обработок с внесением 2 раза за ротацию навоза и заправки соломы. Урожайность озимой пшеницы была ниже при монокультуре и выше – по предшественнику эспарцету.

В то же время необходимо учитывать, что потенциально возможный урожай сельскохозяйственных культур зависит от величины фотосинтетически активной радиации за период биологической активности почв, оптимальных значений увлажнения и температуры. Свойства почв определяют КПД использования ФАР (чаще 1-3%). Для обеспечения растений элементами питания с целью получения планируемого урожая производят окультуривание почв и вносят удобрения и мелиоранты. Однако гранулометрический и минералогический состав почв, показатели водно-воздушного режима определяют допустимые дозы внесения в почву биофильных элементов, которые частично прочно закрепляются почвой, частично мигрируют в грунтовые воды и теряются с испарением из почв.

К сожалению, эти факторы не учитываются в балансовых расчетах.

Сочетание свойств почв определяет коэффициенты использования биофильных элементов растениями из почв и удобрений.

Таким образом, для каждой почвенно-климатической зоны существуют свои предельно возможные урожаи отдельных культур и свои пределы экономически и экологически оправданных урожаев. Это определяет проявление закона убывающей отдачи при интенсификации сельскохозяйственного производства.

Выводы

1. Окультуривание дерново-подзолистых почв и обыкновенных черноземов в длительных полевых опытах РГА-МСХА, ОАО «Заветы Ильича» и Северо-Кубанской сельскохозяйственной опытной станции Краснодарского края привело к увеличению урожайности районированных сельскохозяйственных культур.

2. Применение удобрений на дерново-подзолистых почвах из расчета получения урожая на использование 2% ФАР ($N_{136}P_{12}K_{31}$) на хорошо окультуренной почве позволило получить урожай озимой пшеницы до 39 ц/га.

3. Применение удобрений на обыкновенном черноземе Северо-Кубанской сельскохозяйственной опытной станции $N_{45}P_{53}K_{36}$ позволило получить урожай озимой пшеницы до 50 ц/га.

4. Большая эффективность установлена при совместном применении минеральных и органических удобрений, компостов.

5. В длительном производственном опыте хозяйства Краснодарского края при внесении сложного компоста получен урожай зерна кукурузы до 95 ц га⁻¹.

Оптимизация окислительно-восстановительных и кислотно-основных свойств почв и урожай сельскохозяйственных культур

Высокое плодородие почв определяется оптимальным сочетанием свойств, процессов и режимов почв для получения высоких урожаев с учетом экономики и экологии. В значительной степени оно характеризуется оптимальным кислотно-основным и окислительно-восстановительным состояниями почв, которые являются индикаторами большинства протекающих в почвах процессов.

При этом большое значение имеют взаимосвязи свойств почв во времени и в пространстве (в т.ч. по почвенному профилю, во внешних и внутренних частях структурных отдельностей. Очень большое значение имеют и взаимосвязи в системе почва – растение – микроорганизмы. С экологической и опосредованно с экономической точек зрения важны и взаимосвязи системы почва – растение – микроорганизмы с другими компонентами ландшафта.

Статистическая обработка данных многолетних полевых опытов кафедры

растениеводства РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева и анализ ранее взятых образцов с опытов позволили установить оптимальные свойства дерново-подзолистых почв для получения высоких урожаев сельскохозяйственных культур в 7-польном полевом севообороте.

Так, наиболее высокий урожай сельскохозяйственных культур был получен при содержании подвижных форм P_2O_5 330 мг/кг, обменного калия – 190 мг, S – 180 мг-экв на 1 кг почв при содержании гумуса 2%, объемный вес – 1.1 г/см³, скважность – до 55-60%, коэффициент структурности – 1,2; пористость аэрации – 40%, pH = 5,9, содержание гумуса – 2,8%.

Если сравнить урожайность сельскохозяйственных культур на хорошо окультуренных дерново-подзолистых почвах и при внесении удобрений на 3% ФАР: пшеницы – 37 ц/га, картофеля – 54 т/га, трав 2-го года пользования – 93 ц/га. В то же время, на дерново-подзолистой неокультуренной почве опыта урожайность озимой пшеницы составляла 14,2 ц/га, картофеля – 31 т/га, трав 2-го года – 28 ц/га.

При этом энергоемкость гумуса (млн. ккал/га) при слабой и высокой окультуренности составляла соответственно 195-210 и 284-335; энергоемкость почв соответственно – 352 и 517-563 млн. ккал/га.

На слабоокультуренной почве с энергетической точки зрения было более выгодно выращивать многолетние травы, на хорошо окультуренной – пшеницу. На слабоокультуренной почве был больше риск падения урожая при неблагоприятных климатических условиях, чем на хорошо окультуренной: для трав 1-го года соответственно - 70,0 и 45,1%; для овса – 92,8 и 79,0%, для озимой пшеницы – 99,0 и 96,7%.

На полях с высоким уровнем почвенного плодородия расчетные дозы удобрений составляли (для 3% ФАР) по азоту – 75,1 кг/га, фосфору – 27,5; калию – 72,4 кг/га д.в.

В опытах, проведенных в хозяйстве Краснодарского края на обыкновенном черноземе, установлено, что при внесении за период десять лет в почву сложного компоста из фосфогипса, отходов сельскохозяйственного производства, на фоне N_{60} в дозе 65 т/га 1 раз в 5 лет привело как к оптимизации свойств почв, так и к повышению урожайности зерна кукурузы на 11-20 ц/га, по сравнению с контролем. Урожай зерна кукурузы достигал 95 ц/га.

В опытах, проведенных на Северо-Кубанской сельскохозяйственной опытной станции, урожай озимой пшеницы составлял 58-65 ц/га с хорошим технологическим качеством зерна и низкими энергетическими затратами 3,4-4,5 ГДж/га. При выращивании озимой пшеницы после эспарцета урожайность озимой пшеницы в контрольном варианте составляла 4,9 т/га при минимальной

дозе NPK: N – 10 кг д.в./га; P_2O_5 – 20, K_2O – 0 – 5,7 кг/га; при высокой дозе NPK, равной 40 кг д.в. N; 80 кг д.в. P_2O_5 урожайность озимой пшеницы составила 62 ц/га, при средней дозе NPK, равной 20 кг д.в. N; 40 кг д.в. P_2O_5 урожайность составила 60 ц/га, а при последствии навоза и заправки соломы – 62 ц/га. В то же время, при выращивании озимой пшеницы по озимой пшенице урожай в контроле был 36 ц/га, а при внесении высокой дозы NPK – 56 ц/га.

Таким образом, урожай озимой пшеницы возрастал при внесении NPK в дозах до 40 кг д.в. N, 80 кг д.в. P_2O_5 . Однако прирост урожая с увеличением дозы возрастал незначительно. Проявлялся закон убывающей отдачи. При органо-минеральной системе удобрений проявление этого закона уменьшалось.

По полученным данным, на урожай озимой пшеницы существенно влиял предшественник. При выращивании озимой пшеницы по озимой пшенице, несмотря на применение NPK по 120 кг д.в. на 1 га, урожай культуры не превышал 51 ц/га. Лучшая окупаемость удобрений зерном отмечалась на озимой пшенице по предшественнику-гороху – 11,7-28,7 кг/га, самая низкая – 4,6-12,0 кг/га по озимой пшенице.

С увеличением доз удобрений общие энергоресурсы на производство зерна возрастали с 8-21% по предшественнику эспарцет и горох до 55-73% - при размещении пшеницы по пшенице и сахарной свекле. При получении высоких урожаев озимой пшеницы на обыкновенном черноземе содержание подвижных форм элементов питания составляло в мг/кг: N – 12-14; P_2O_5 – 26-46; K_2O – 376-402.

По полученным нами данным, с пожнивными остатками озимой пшеницы в почву возвращалось от 25 до 53 кг/га азота, 10-16 кг фосфора, 55-92 кг/га калия, в то время как с пожнивными остатками эспарцета в 1,2-3 раза больше.

Таким образом, кислотно-основное и окислительно-восстановительное состояние почв в значительной степени определяют свойства почв. При оптимальных значениях этих показателей в дерново-подзолистых почвах урожай озимой пшеницы составлял до 37 ц/га, на черноземе – до 62 ц/га. На баланс биофильных элементов в почвах существенно влиял предшественник культуры. При внесении удобрений в возрастающих дозах проявлялся закон убывающей отдачи. Правильный выбор предшественника и органо-минеральная система удобрений уменьшали проявление закона убывающей отдачи.

Полученные нами экспериментальные данные подтверждают, что при выращивании сельскохозяйственных культур и внесении в почву удобрений существенный вклад в баланс биофильных элементов в системе почва-растение вносят не только вынос NPK с урожаем, но также выделение с транспирацией из растений, с испарениями из почв, массопереносом соединений в грунтовые воды,

необменное связывание и закрепление почвой, возвращение в почву с корневыми и надземными пожнивными остатками.

Урожай сельскохозяйственных культур определяется комплексом различных показателей, но важным представляется находить оптимальные показатели почв, которые будут обеспечивать КПД использования ФАР культурой.

Однако эти показатели отличаются для отдельных фаз развития растений, видов и сортов растений. Регулирование свойств, процессов и режимов кислотного и окислительно-восстановительного состояния почв в значительной степени позволяет оптимизировать указанные ранее факторы жизни растений.

Выводы

1. Кислотно-основное и окислительно-восстановительное состояние почв в значительной степени определяет все факторы жизни растений, связанные с почвой.

2. Оптимизация окислительно-восстановительного и кислотного состояния изученных почв существенно изменила характер их инфракрасных спектров, дериватограмм, характер кривых потенциометрического титрования.

3. Изменение свойств почв при их окультуривании, в первую очередь, идентифицируются по анализу внешних и внутренних слоев структурных отдельностей.

4. Применение органо-минеральных удобрений приводит к оструктуриванию почв. Существенное влияние на интенсивность этого процесса оказывает и обработка почв.

5. Оптимизация этих факторов на данном уровне интенсификации земледелия в полевых опытах в производственных условиях способствует получению урожая озимой пшеницы на дерново-подзолистых окультуренных почвах в среднем 37-40 ц/га, на обыкновенных черноземах – до 65 ц/га.

6. Применение минеральных удобрений на дерново-подзолистых почвах на усвоение растениями 3% ФАР не привело к существенному повышению урожайности (проявляется закон убывающей отдачи). На обыкновенных черноземах экономически рентабельной дозой удобрений под озимую пшеницу было 20-40 кг д.в. на 1 га фосфора и калия. При дальнейшем увеличении доз существенно проявляется закон убывающей отдачи.

7. Применение органо-минеральных системы удобрений и правильное чередование культур в севообороте существенно снижали проявление закона убывающей отдачи.

Проявление закона убывающей отдачи при интенсивном развитии сельскохозяйственного производства

Кислотно-основное и окислительно-восстановительное состояние почв существенно влияет на степень проявления в почвах закона «убывающего плодородия» (закона убывающей отдачи). Этот закон проявляется, как при уменьшении дохода на 1 руб. затрат при выращивании культур, так и по уменьшению содержания подвижных форм биофильных элементов в почвах при увеличении доз удобрений. Это подтверждается экспериментальными данными, рассчитанными для опытных полей и стационарных площадок РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева на дерново-подзолистых почвах Московской области, на опытных полях Северо-Кубанской опытной станции.

На среднекультуренной дерново-подзолистой почве при прогнозе использования растениями 2% ФАР дозы удобрений составили 122 кг/га азота, 15,1 кг/га – фосфора, 95,2 кг/га – калия, а на усвоение 3% ФАР – 162,4 кг/га азота, 23,3 – фосфора, 128,5 кг/га калия.

Дозы удобрений, принятые в севообороте на обыкновенных черноземах Краснодарского края, составляли $N_{45}P_{50}K_{30,5}$ и $N_{85,6}P_{106}K_{71,2}$ при оценке влияния доз удобрений на проявление закона убывающей отдачи, и $N_{60}P_{60}K_{60}$ и $N_{120}P_{120}K_{120}$ – при оценке влияния предшественников на урожай.

Закон убывающего плодородия проявляется при применении возрастающих доз удобрений не только в снижении дохода на 1 рубль затрат, но и в уменьшении прироста содержания подвижных форм биофильных элементов на 100 кг внесенных удобрений.

В проведенных исследованиях показано, что закон убывающей отдачи проявляется и по увеличению подвижных форм биофильных элементов в почвах при увеличении доз удобрений. Это иллюстрируется данными следующей таблицы.

Как видно из представленных данных, при внесении повышенных доз $CaCO_3$ положительный эффект от их действия ослабевает.

Проявление закона убывающей отдачи отмечается и для дерново-подзолистых почв, и для черноземов, что подтверждается данными многолетних опытов. Увеличение дозы удобрений почти в 2 раза не привело к адекватному увеличению содержания гумуса, подвижного фосфора и обменного калия.

Однако сбалансированное увеличение доз удобрений, вносимых под использование 2% ФАР и 3% ФАР, в меньшей степени повлияло на баланс биофильных элементов в севообороте. Закон убывающей отдачи проявляется и по балансу биофильных элементов в звене полевого севооборота. При внесении 122 кг азота увеличение его содержания в почве составило 89,3 кг/га, а при

внесении 162 кг/га – 116 кг/га, т.е. 0,7 кг/га и 0,7 кг/га, P_2O_5 соответственно 0,8 и 0,7 кг/га.

Кислотно-основное и окислительно-восстановительное состояние почв и образование агрономически ценной структуры

Окислительно-восстановительный потенциал отличается на поверхности и внутри структурных отдельностей, в более крупных агрегатах и в более мелких.

Так, по полученным нами данным, в структурных отдельностях 5-3 мм пахотного горизонта дерново-подзолистых почв Eh составлял для удобренной и неудобренной среднеокультуренной почвы соответственно 618 и 630 мВ, а для агрегатов < 0,25 мм соответственно 410 и 495 мВ. В слабоокультуренной дерново-подзолистой почве содержание агрегатов > 3 мм в % составляло 0,11%, а в хорошо окультуренной – 0,58%. Внесение в почвы минеральных удобрений значительно повысило в них содержание агрегатов > 3 мм: в среднеокультуренных почвах – от 0 до 3,9%. В хорошо окультуренных – от 0,6 до 26,0%. Однако в большей степени повысило содержание агрегатов > 3 мм внесение пожнивных остатков пшеницы 3 г на 100 г почв: в среднеокультуренных почвах при малой и средней дозе NPK – от 15,7 до 19,2%, а в хорошо окультуренных – от 10,0 до 42,4%.

В обыкновенных черноземах структурное состояние почв (Y) также в значительной степени зависит от содержания органического вещества (Г) и в меньшей степени от рН и содержания подвижных форм P_2O_5 .

$$Y = -0,99 + 0,68Г + 0,08рН + 0,01P_2O_5; r = 0,69; F = 4,3.$$

Внесение в почву навоза и сложного органо-минерального компоста привело к увеличению содержания агрегатов 2-1 мм от 15,5 до 16,8 и 18,8%, агрегатов 1-0,5 мм – от 11,6 до 13,0 и 15,0%. Это соответствует установленной структурообразующей и комплексообразующей способности органических веществ.

Кислотно-основное и окислительно-восстановительное состояние почв определяет плодородие почв и урожай сельскохозяйственных культур. Однако при интенсификации сельскохозяйственного производства также проявляется закон «убывающей отдачи».

Закон убывающей отдачи проявляется по уменьшению прироста урожая на 1 ц NPK. Так, при выращивании пшеницы на хорошо окультуренной дерново-подзолистой почве с внесением удобрений на использование растениями 2% ФАР и 3% ФАР отчуждение с урожаем составляло соответственно 29,3 и 25,3 млн. ккал/га или на 1 ц NPK – 0,39 и 0,22 для благоприятных погодных условий и 0,005 и 0,002 – для плохих погодных условий.

При применении под озимую пшеницу на обыкновенных черноземах по 30

и по 120 кг NPK коэффициент чистой эффективности составил соответственно 5,5 и 4,5.

При применении повышенных доз минеральных удобрений закон «убывающей отдачи» проявляется и по изменению биохимического состава растений. Это иллюстрируют данные таблицы 10.

Таблица 10 - Изменение содержания клейковины и белка в зерне озимой пшеницы в зависимости от доз минеральных удобрений на черноземе обыкновенном

Вариант	Увеличение содержания клейковины и белка на 1 кг вносимых удобрений *	
	клейковина	белок
N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀	0,03	0,03
N ₁₂₀ P ₁₂₀ K ₁₂₀	0,04	0,01

*) озимая пшеница по озимой пшенице

Выводы

1. Закон убывающей отдачи или закон убывающего плодородия проявляется в системе почва-растение при увеличении доз удобрений. Степень его проявления идентифицируется по изменению содержания в почвах биофильных элементов, гумуса, структурного состояния почв на 100 кг д.в. внесенных удобрений, по изменению pH на 1 т CaCO₃, по изменению биопродуктивности угодий, биохимического состава растений, по накоплению энергии в почве и в урожае сельскохозяйственных культур на 100 кг д.в. вносимых удобрений.

2. Степень проявления закона отличается в разных интервалах доз удобрений, в почвах разной степени окультуренности, под отдельными культурами и зависит от предшественников в севообороте. Степень проявления закона убывающей отдачи в почвах характеризует генезис и плодородие почв, их балл, экономическую оценку, рациональные уровни химизации для конкретных почв и систем земледелия.