

На правах рукописи



Бережнов Дмитрий Игоревич

**ВЛИЯНИЕ ДЛИТЕЛЬНОГО ПРИМЕНЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ
СИСТЕМ УДОБРЕНИЯ И ДЕФЕКТА НА РЕЖИМ ФОСФОРА
ЧЕРНОЗЕМА ВЫЩЕЛОЧЕННОГО В УСЛОВИЯХ
ЛЕСОСТЕПИ ОКСКО-ДОНСКОЙ РАВНИНЫ**

Специальность 06.01.04 – агрохимия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата сельскохозяйственных наук

Воронеж
2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I».

Научный руководитель: **Стекольников Константин Егорович** - доктор сельскохозяйственных наук, кафедра агрохимии, почвоведения и агроэкологии ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», профессор

Официальные оппоненты: **Мазиров Михаил Арнольдович** – доктор биологических наук, профессор, кафедра земледелия и методики опытного дела ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева», профессор
Титова Вера Ивановна – доктор сельскохозяйственных наук, профессор, кафедра агрохимии и агроэкологии ФГБОУ ВО «Нижегородская государственная сельскохозяйственная академия», заведующий кафедрой

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт сахарной свеклы и сахара имени А.Л. Мазлумова».

Защита состоится «26» сентября 2022 года в 13 часов ауд. 149 на заседании диссертационного совета Д 220.010.07 на базе ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», по адресу: 394087, г. Воронеж, ул. Мичурина, 1; тел./факс +7(473) 253-86-51, e-mail: stekolnikova-nv@mail.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I» и на сайте www.ds.vsau.ru, с авторефератом – на сайте ВАК Министерства образования и науки РФ www.vak.minobrnauki.gov.ru и ВГАУ www.ds.vsau.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 2022 года.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные и скрепленные гербовой печатью организации, просим направлять ученому секретарю диссертационного совета.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Стекольников Н.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В земной коре преобладают восемь химических элементов, на долю которых приходится до 90% общего содержания, все остальные химические элементы, в том числе и фосфор, находятся в земной коре в рассеянном состоянии. Среднее содержание этого элемента в земной коре незначительно, всего около 0,08–0,09% ее массы, в месторождениях – уже гораздо больше от 10–40%. Фосфор является важным биогенным элементом, необходимым для питания растений, участвует в сложных метаболических процессах (фотосинтез, передача энергии, синтез и расщепление углеводов). Фосфор содержится в почве в составе органических соединений и минералов. Количество легкодоступного фосфора очень мало по сравнению с общим количеством фосфора в почве.

В агрохимии, земледелии и растениеводстве традиционно уделяют главное внимание содержанию и запасам макроэлементов. Этот подход, сложившийся за длительный период практической деятельности человека, оправдал себя. Еще со времен Либиха была выявлена связь содержания макроэлементов с величиной урожая сельскохозяйственных культур. Установленные наукой законы питания растений надежно подтверждались практикой, в частности это касается знаменитой «бочки Либиха», наглядно демонстрирующей закон минимума. Величину урожая по этому закону определяет элемент, находящийся в минимуме. Этот закон имеет максимальное проявление как раз по фосфору. Из всех макроэлементов фосфор занимает особое положение. Если азот и калий могут поглощаться растениями из удобрений и почвы на 40–70%, то фосфор всего на 7–21%.

Ведение хозяйственной деятельности сельхозтоваропроизводителями, в частности длительное внесение органических и минеральных удобрений, оказывает влияние на физико-химические свойства почв, в том числе и режим фосфора. В связи с вышеизложенным аспекты совершенствования применяемых систем удобрений являются актуальными.

Степень разработанности темы исследования. Еще Д.Н. Прянишников указывал на необходимость регулирования биологического круговорота веществ в агроценозах. Первыми изучать фосфатный режим почв стали такие известные ученые, как Д.И. Менделеев (1868–1869), А.И. Энгельгардт (1878–1887), П.А. Костычев (1881), Д.Н. Прянишников (1928). Эти ученые первыми заложили опыты, направленные на изучение реакции разных сельскохозяйственных культур на фосфорные удобрения.

Огромный вклад в изучение фосфора в системе «фосфор – почва – растение» внесли А.П. Душечкин (1914), К.К. Гедройц (1918), М.А. Егоров (1926), Н.П. Карпинский (1933), А.Ф. Тюлин (1952), Ф.В. Чириков (1939), В.В. Геммерлинг (1941), С.А. Кудрин (1942), П.А. Дмитренко (1993), Д.Л. Аскинази (1949), А.В. Соколов (1950), П.Г. Адерихин (1952–1970), Р.Е. Емешев (1983) и др. Эти ученые доказали зависимость агрохимических свойств почв, а также реакции растений от эффективности применения различных форм фосфатов.

Установлено, что черноземы суглинистого и глинистого гранулометрического состава хорошо обеспечены фосфором (Л.М. Войкин, 1968; Г.Г. Дуда, 1973; Г.П. Гамзиков, 1975; А.Б. Салманов, 1976 и др.), при этом в почвах с по-

вышенным уровнем гумусированности содержание фосфора более высокое, чем в менее гумусированных (Н.И. Богданов, 1954; Г.М. Кривоносова, 1980; А.П. Лешков, 1987 и др.). В работах многих исследователей отмечается роль минеральных и органических удобрений в аккумуляции фосфора в черноземах и других почвах (Ашрам Мазен Джумах, 2012; Г.П. Гамзиков, 2004; Н.К. Крупский, 1970; А.Ю. Кудеярова, 1983 и др.). П.Г. Адерихин (1949), А.Ф. Тюлин, Т.А. Маломахова (1952), В.И. Кирюшин (1996), Л.М. Войкин (1972), К.Е. Гинзбург (1971), А.Ф. Стулин (1990) и др. установили существенную прямую корреляционную зависимость между содержанием фосфора и содержанием обменных катионов кальция, между валовым содержанием и степенью окультуривания. По мнению О.Г. Ониани «...несмотря на многочисленные исследования, поведение фосфора в почве все еще остается одной из самых загадочных проблем, стоящих перед исследователями». Мы разделяем это мнение и разработали программу исследований, направленных на разрешение отмеченной выше актуальной проблемы.

Цель и задачи исследования. Цель диссертационной работы заключается в изучении и выявлении влияния длительного применения систем удобрения и дефеката на физико-химические свойства и режим фосфора чернозема выщелоченного в условиях лесостепи Окско-Донской равнины.

Для достижения заявленной цели были поставлены следующие **задачи**:

- изучить влияние многолетнего внесения органических и минеральных удобрений и дефеката на физико-химические свойства чернозема выщелоченного;
- выявить влияние длительного применения органических, минеральных удобрений и дефеката на содержание и характер распределения по профилю различных форм фосфора, в том числе подвижных форм фосфора, ортофосфатов;
- исследовать влияние длительного применения систем удобрения и дефеката на фосфатный потенциал и потенциальную буферную способность чернозема выщелоченного.

Научная новизна диссертационного исследования. Впервые в условиях ЧЦР на преобладающем подтипе черноземов – черноземе выщелоченном выполнены комплексные исследования влияния длительного применения различных систем удобрения и дефеката на физико-химические свойства и режим фосфора.

Установлено, что длительное применение удобрений способствует существенному подкислению изучаемой почвы. Последствие дефеката компенсирует агрогенное подкисление изучаемой почвы и обеспечивает стабилизацию физико-химических свойств на оптимальном уровне. Длительное применение удобрений и дефеката существенно повышает содержание всех форм фосфора. Дефекат в последствии компенсирует подкисление

Установлены основные закономерности влияния длительного применения удобрений и дефеката на фосфатное состояние изучаемых почв. Выявлены основные закономерности накопления различных форм фосфора и его подвижность, особенности профильного распределения.

Теоретическая и практическая значимость работы. Впервые в условиях ЧЦР на преобладающем подтипе черноземов – черноземе выщелоченном выполнены комплексные исследования влияния длительного применения различных систем удобрения и дефеката на режим фосфора. Установлено, что длительное применение удобрений и дефеката существенно повышает содержание всех форм фосфора. При этом наблюдается существенное подкисление изучаемой

мой почвы. Дефекат в последствии компенсирует подкисление и обеспечивает стабилизацию физико-химических свойств на оптимальном уровне.

Установлены основные закономерности влияния длительного применения удобрений и дефеката на фосфатное состояние изучаемых почв. Выявлены основные закономерности накопления различных форм фосфора и его подвижность, особенности профильного распределения.

Методология и методы исследования. Методологической основой работы является системный подход к изучаемой проблеме и детальный анализ материалов исследований отечественных и зарубежных ученых. В работе применялись экспериментальные, аналитические и статистические методы исследований. Полевые и лабораторные опыты выполнялись по общепринятым методам в агрохимии и почвоведении.

Положения, выносимые на защиту.

На защиту выносятся концепция формирования фосфатного режима черноземных почв, базирующаяся на следующих выявленных зависимостях.

1. Длительное применение различных систем удобрения обуславливает существенное подкисление изучаемой почвы. Последствие дефеката не только компенсирует подкисление, но и обеспечивает стабилизацию физико-химических свойств на оптимальном уровне.

2. Длительное применение различных систем удобрения обуславливает перераспределение различных форм фосфора по профилю изучаемой почвы.

3. Содержание и характер распределения подвижных форм фосфора и ортофосфатов в условиях длительного применения агрохимикатов на черноземе выщелоченном.

4. Формирование фосфатного потенциала и потенциальной буферной способности чернозема выщелоченного под влиянием длительного применения систем удобрения и дефеката.

5. Регулярное известкование как основной прием компенсации агрогенного подкисления изучаемой почвы, стабилизации физико-химических свойств и, как следствие, режима фосфора на оптимальном уровне.

Степень достоверности результатов исследования подтверждается данными проведенного анализа значительного количества опубликованных источников информации, обобщением теоретических достижений российских и зарубежных исследователей, собственных экспериментальных данных, полученных в полевых и лабораторных условиях в соответствии с обоснованной схемой опыта, использованием апробированных методик, необходимого количества наблюдений, учетов и анализов, статистической обработкой экспериментальных данных.

Апробация результатов исследования. Основные положения и результаты диссертационного исследования опубликованы в рецензируемых научных изданиях и докладывались на различных научно-практических конференциях в 2019–2021 гг.

Фактический материал и основные теоретические положения работы используются при чтении курсов лекций по агрохимии и почвоведению, воспроизводству плодородия почв, читаемых на факультете агрономии, агрохимии, и экологии Воронежского ГАУ.

Публикация результатов исследования. Основные положения и результаты диссертационного исследования нашли отражение в 8 опубликованных

работах (общий объем – 6,98 п.л., из них подготовлено самостоятельно – 2,30 п.л.), при этом 2 работы опубликованы в рецензируемых научных изданиях.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения, рекомендаций производству, списка литературы, изложена на 172 страницах компьютерного текста, содержит 35 таблиц и 42 рисунка. Список литературы включает 191 источник.

РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

В главе 1 приводятся сведения о состоянии соединений фосфора в черноземах и их трансформации под влиянием антропогенеза. На содержание и доступность соединений фосфора кардинальным образом повлияло применение минеральных удобрений. И если в первой половине XX в. масштабы их применения были невелики, то с развитием производства минеральных удобрений дозы существенно возрастали. К сожалению, темпы роста применения минеральных удобрений не сопровождалось соответствующим ростом урожаев с.-х. культур. В ЦЧР пик применения минеральных удобрений пришелся на 80-е годы XX в. Это привело к формированию в период 1970–1990 гг. положительного баланса фосфора в пахотных почвах.

Минеральные удобрения, являясь мощнейшим фактором повышения продуктивности пашни, резко увеличивают концентрацию ионов в жидкой фазе почв. Для определения минеральных соединений в настоящее время широко используются методы Чирикова, Чанга-Джексона, Гинзбург-Лебедевой.

Особый интерес представляет способность почвы поддерживать концентрацию фосфатов на постоянном уровне, которую С.М. Драчев в 1928 г. назвал фосфатной буферной способностью почв. В 1964 г. П. Бекетт П. и Р. Уайт ввели понятие потенциальной буферной способности почв по отношению к фосфатам (ПБСР), величину которой обычно находят одновременно с фосфатным потенциалом. В исследованиях Р.Е. Елешева с соавт. были выявлены основные закономерности подвижности соединений фосфора в почвах, предложено использовать термин «интенсивность», а также способы ее выражения.

Режим фосфора в почвах ЦЧР изучен недостаточно. Большое количество исследований было выполнено в середине XX в. (П.Г. Адерихин с соавт., К.Е. Гинзбург и др.).

Анализ литературных источников показал, что в отличие от режима азота и калия режим фосфора в черноземах ЦЧР изучен недостаточно, поэтому этот аспект требует особого внимания.

В главе 2 приводится описание объекта и методов исследования. Влияние различных систем удобрения и дефеката на физико-химические свойства и режим фосфора чернозема выщелоченного изучали в условиях длительного стационарного опыта, заложенного на территории УНТЦ «Агротехнология» Воронежского ГАУ (север Воронежской области) в 1987 г., включающего 15 вариантов. Использовали следующие варианты: 1) контроль без удобрений (*K*); 2) фон – навоз 40 т/га за ротацию или 8 т/га ежегодно (Φ); 3) фон + $N_{60}P_{60}K_{60}$; 5) фон + $N_{120}P_{120}K_{120}$; 13) фон + дефекат 28 т/га, внесенный один раз за ротацию (*D* + орг. фон); 15) дефекат + $N_{60}P_{60}K_{60}$ (*D* + 1NPK).

Почва стационара – чернозем выщелоченный малогумусный среднемощный тяжелосуглинистый со следующей характеристикой в исходном состоянии: содержание гумуса – 4,20%, рН водной вытяжки – 5,58–6,15, рН солевой вытяжки – 5,14–5,48, сумма обменных оснований – 26,3–30,3 мг-экв/100 г почвы, гидролитическая кислотность – 5,20–7,03 мг-экв/100 г почвы, степень насыщенности основаниями – 81–85%. Опыт заложен в четырехкратной повторности в следующем севообороте: пар черный – озимая пшеница – сахарная свекла – вико-овсяная смесь – озимая пшеница – ячмень.

Все культуры севооборота выращивались с учетом агротехнических требований их возделывания в условиях Воронежской области. Минеральные удобрения вносились ежегодно. Применялась аммиачная селитра, двойной суперфосфат, хлористый калий. Навоз вносился один раз за ротацию под сахарную свеклу в дозе 40 т/га. Дефекат в дозе 28 т/га был внесен в черном пару под озимую пшеницу в 1987 г. и повторно в дозе 20 т/га в 1999 г. (начало третьей ротации севооборота) на 13 и 15 вариантах. В 2005 г. (начало четвертой ротации севооборота) внесено по 22 т/га дефеката на 13 и 15 вариантах.

Отбор образцов проводился с постоянных динамических площадок на глубину 1,0 м, послойно с шагом 20 см.

Химические анализы почвы и растений проводили в лаборатории кафедры агрохимии, почвоведения и агроэкологии ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ по стандартным методикам и ГОСТам. В лабораторных условиях определяли: рН водной вытяжки потенциометрическим методом; рН солевой вытяжки по методу ЦИНАО (ГОСТ 26483-85); гидролитическая кислотность по методу Каппена с потенциометрическим окончанием (ГОСТ 26212-91); сумма обменных оснований по методу Каппена-Гильковица; степень насыщенности основаниями расчетным методом; рН водной и солевой вытяжек в насыщенных почвенных пастах; формы фосфора (общий, минеральный и органический) по методу Сендерса-Вильямса; подвижный фосфор по методу Чирикова; подвижный и обменный фосфор по методу Брейя и Куртца; ортофосфаты по методу Карпинского и Замятиной; гранулометрический состав по Качинскому.

В главе 3 приводятся результаты определения влияния систем применения удобрений и дефеката на физико-химические свойства чернозема выщелоченного. Установлено, что подвижность и доступность растениям различных форм фосфора определяется физико-химическими условиями, и прежде всего, режимом кислотности (Рисунок 1–5).

Изменение величины рН водной и солевой вытяжек под влиянием систем применения удобрения и дефеката за исследуемый период представлено на рисунке 1, *а* и *б*. Актуальная и обменная кислотность очень динамична во времени и пространстве. Эти изменения затрагивают не только верхние слои почвы, но и весь почвенный профиль. И если изменения по годам наблюдений определяются главным образом гидротермическими условиями, то изменения по вариантам опыта обусловлены системой применения удобрения и дефеката.

Общей закономерностью изменений величины рН водной и солевой вытяжек в пределах гумусового слоя является формирование трех групп вариантов: с максимальными величинами – варианты с дефекатом (*Д*), минимальными – варианты органоминеральной системы удобрения (*ОМСУ*) и промежуточными –

варианты контроля (*К*) и органической системы удобрения (*ОСУ*). Выявлен хорошо выраженный эффект подкисления на вариантах *ОМСУ*, а также на варианте *ОСУ*. Дефекат даже в последствии стабилизирует актуальную и обменную кислотность в оптимальном диапазоне. Наибольший нейтрализующий эффект наблюдается на варианте *Д + орг. фон*.

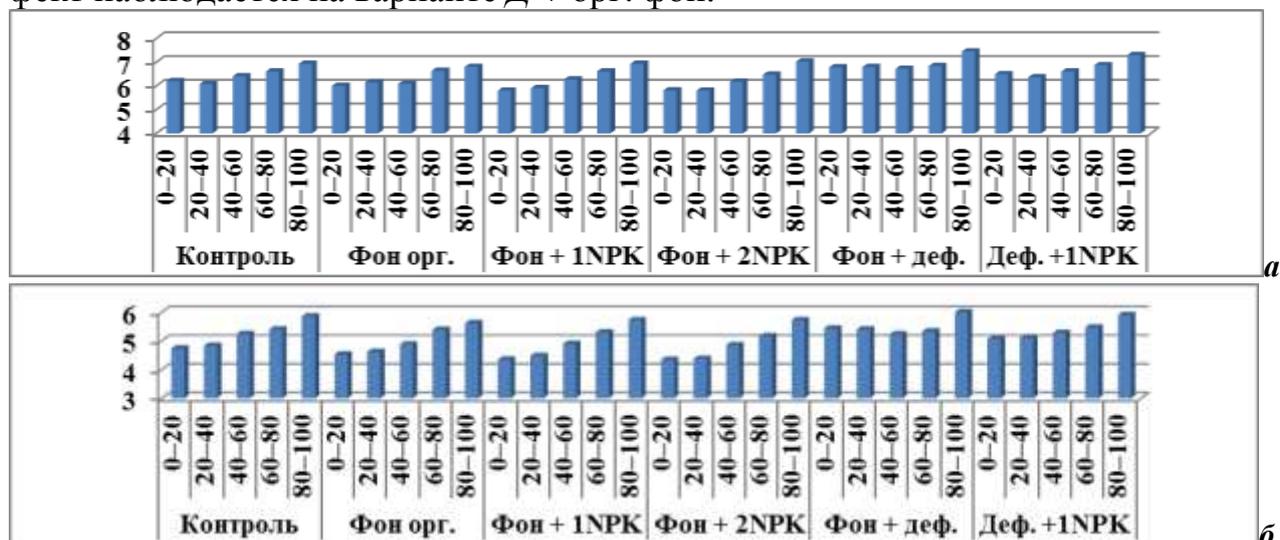


Рисунок 1 – Влияние удобрений и дефеката на величину рН водной вытяжки в насыщенной пасте, среднее за ротацию: *а* – НСР₀₅ 0,53; *б* – НСР₀₅ 0,60

Величины рН определяли в водной и солевой вытяжках в насыщенных водой почвенных пастах при соотношении почва : раствор = 1 : 0,5. Считаем что это соотношение наиболее близко к уровню естественного увлажнения почвы, равному 50%. Подобное состояние почвы возможно после снеготаяния или при выпадении ливневых осадков, так характерных в изучаемых условиях лесостепной зоны. При стандартном соотношении 1 : 2,5 получается суспензия или 250% влажность. Это приводит к весьма существенному разбавлению почвенного раствора и снижению его концентрации. Эффект разбавления наглядно представлен на рисунке 2, *а* и *б* по усредненным данным за 6 лет.

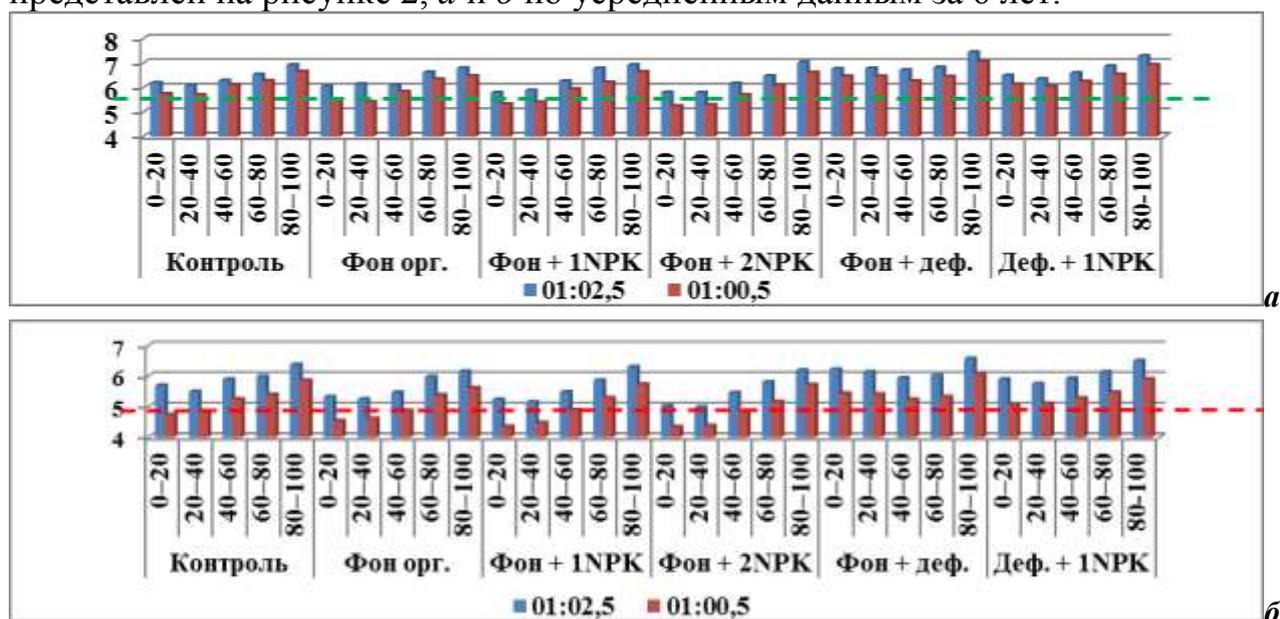


Рисунок 2 – Влияние степени разбавления на величину рН водной вытяжки (*а*) и солевой вытяжки (*б*) (среднее за 6 лет)

Зеленой пунктирной линией отмечен нижний уровень градации нейтральных почв. Этому уровню по данным определений в насыщенных пастах в пахотном слое соответствуют только варианты с дефекатом; по данным определений в стандартной вытяжке этот уровень не достигается только на удобренных вариантах. В стандартной вытяжке величина рН существенно выше, чем в почвенных пастах. Красной пунктирной линией отмечен нижний уровень значений, близких к нейтральным почвам в пахотном слое. Установлено, что стандартная водная и солевая вытяжки существенно завышены по отношению к определениям в насыщенных пастах.

На рисунке 3 показано изменение гидролитической кислотности (Нг) под влиянием удобрений и дефеката. Зеленой пунктирной линией показан уровень нейтральных почв. Ему соответствуют только варианты с дефекатом и в отдельные годы контроль. Красной пунктирной линией показан нижний предел среднекислых почв. Этому уровню соответствуют все удобренные варианты.

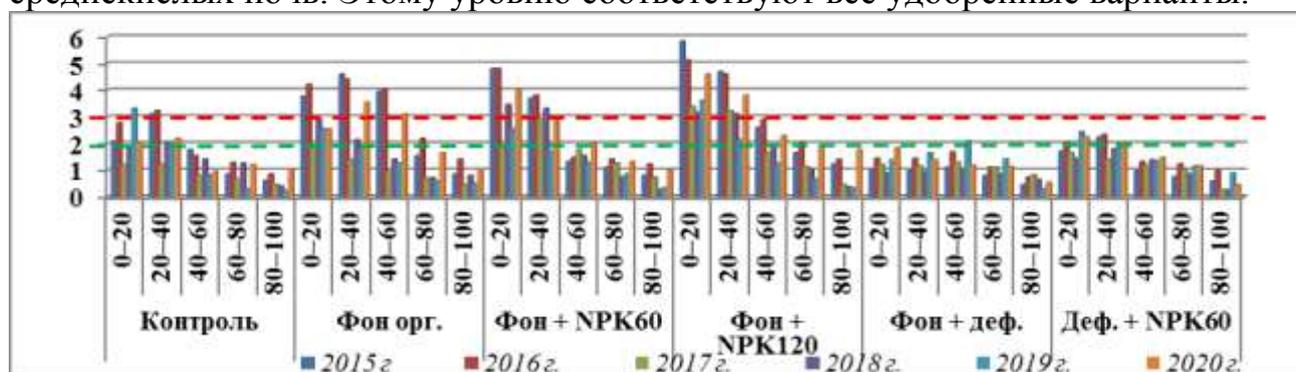


Рисунок 3 – Изменение гидролитической кислотности под влиянием удобрений и дефеката, мг-экв/100 г почвы (НСР₀₅ 0,79)

Установлено, что величина Нг весьма динамична во времени и по профилю изучаемой почвы. Общей закономерностью является существенный рост величины Нг на вариантах с орг. и особенно с мин. удобрениями по орг. фону. Максимальная величина наблюдалась в пахотном слое, с глубиной она прогрессивно уменьшалась. Это обусловлено появлением миграционных форм карбонатов, нейтрализующих кислотность. Минимальная величина Нг наблюдалась на варианте *Д* + орг. фон. На варианте *Д* + с 1NPK Нг несколько выше, но по сравнению с остальными вариантами ниже. Таким образом, *ОСУ* и *ОМСУ* способствуют повышению величины Нг. Последствие дефеката существенно понижало величину Нг и поддерживало на оптимальном уровне – меньше 2 мг-экв/100 г почвы.

Сумма обменных оснований (*S*) считается одним из стабильных показателей физико-химического состояния почв. Однако наши исследования выявили высокую изменчивость этого показателя как во времени, так и по профилю изучаемой почвы (рис. 4). Красной пунктирной линией отмечен верхний предел повышенной обеспеченности поглощенными основаниями в пахотном слое. Этому уровню соответствует только вариант *Д* + орг. фон и частично вариант *Д* + 1NPK. *S* в пахотном слое изучаемой почвы составляла 29,94 мг-экв/100 г почвы до закладки опыта и снижалась в нижней части профиля до 24,27 мг-экв/100 г почвы. За 33 года отмечено существенное снижение величины *S* в пахотном слое до уровня менее 15 мг-экв/100 г почвы (2017 г.). Подобное снижение наблюдалось в паровом поле. Очевидно, это обусловлено преобладанием минерализации растительных

остатков над их гумификацией. Только на вариантах с дефекатом оно было, хотя и незначительно, но выше этого уровня. И это при том, что к 2017 г. мы наблюдаем только последствие дефеката, внесенного в 2005 г. Более двух ротаций севооборота мы наблюдали последствие дефеката и отмечаем явный положительный эффект. По всем годам наблюдений применение дефеката повышало S в сравнении с остальными вариантами. Профиль изучаемой почвы на вариантах с дефекатом имел менее выраженную дифференциацию по этому показателю.

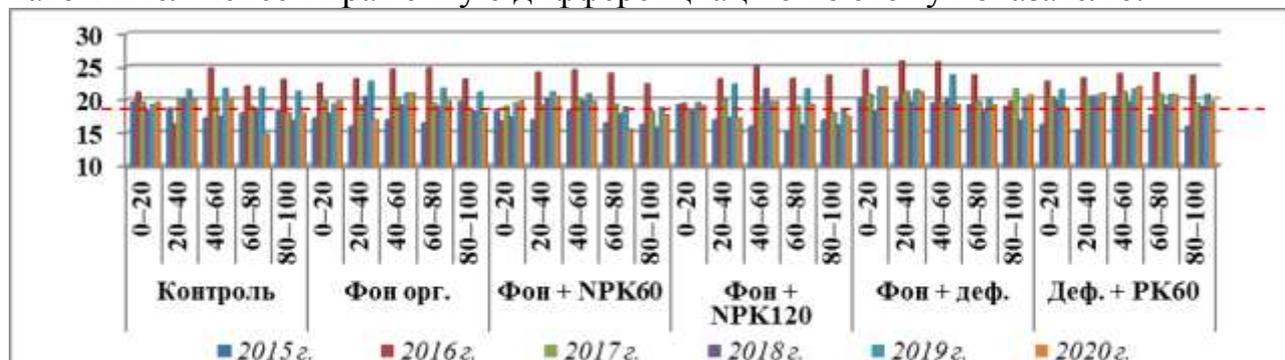


Рисунок 4 – Изменение суммы обменных оснований под влиянием удобрений и дефеката, мг-экв/100 г почвы (НСР₀₅ 2,74)

Степень насыщенности почв основаниями (V) является интегральным показателем физико-химического состояния. На рисунке 5 приведены данные по влиянию удобрений и дефеката на V изучаемой почвы. Зеленой пунктирной линией показан уровень 93%, при котором чернозем не нуждается в известковании. Этот уровень в пахотном слое достигнут только на варианте $D + \text{орг. фон}$. Близок к этому уровню вариант $D + 1\text{NPK}$, на всех остальных вариантах опыта он существенно ниже.

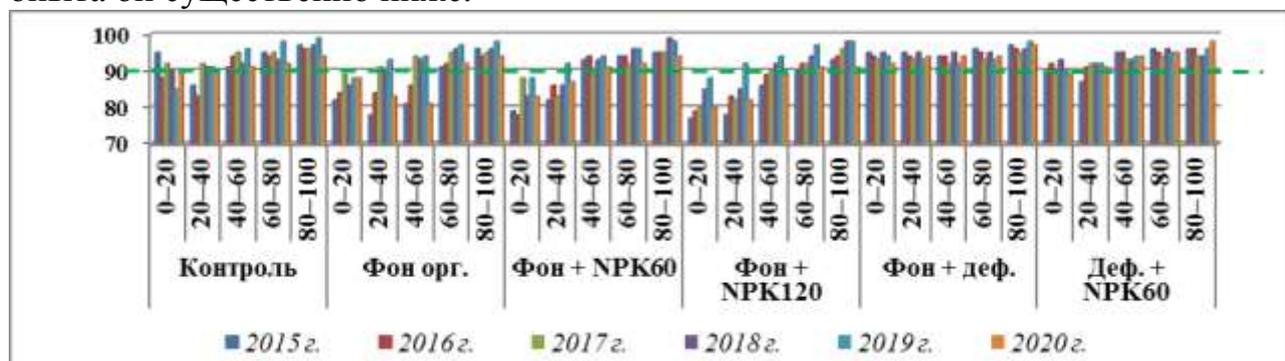


Рисунок 5 – Изменение степени насыщенности основаниями под влиянием удобрений и дефеката, V , % (НСР₀₅ 3,39)

Емкость катионного обмена является одним из относительно стабильных показателей физико-химических показателей почвы. Этот показатель является относительно стабильным, ведь величина H_g очень изменчива. Это действительно так, если учитывать, что мы использовали расчетный метод определения емкости катионного обмена (ЕКО) S и H_g . В исходном состоянии (1987 г.) ЕКО в пахотном слое была на уровне 33,78 мг-экв/100 г почвы. За 33 года мы отмечаем ее существенное уменьшение на всех вариантах опыта. В среднем по вариантам опыта она составила 22,22 мг-экв/100 г почвы, т.е. уменьшилась на 11,56 мг-экв/100 г почвы, или 34,22% относительно исходного состояния. Если в исходном состоянии ЕКО исследуемой почв, соответствовала среднему уров-

ню, то современное ее состояние соответствует умеренно низкому уровню.

Как это было ранее установлено К.Е. Стекольниковым, главной причиной является процесс декальцинирования. Процесс этот продолжается, и последствие дефеката только частично его компенсирует. Наши исследования подтверждают это. Ведь если сравнить варианты с дефекатом, то явно видна общая закономерность. Средняя за наблюдаемый период величина ЕКО на вариантах *К* и с удобрениями составила 21,85, 22,49, 22,11 и 22,60 мг-экв/100 г почвы соответственно, т.е. применение *ОСУ* и *ОМСУ* незначительно повысило ЕКО. Но произошло это за счет повышения Нг и уменьшения S. На вариантах с последствием дефеката S стабильно выше, чем на остальных вариантах, а Нг столь же стабильно ниже. Средняя величина ЕКО на этих вариантах составляет 21,89 и 22,22 мг-экв/100 г почвы. Варианты с дефекатом отличаются друг от друга. На варианте *Д* + орг. фон дефекат имеет остаточное действие или «последствие». Это последствие снижает кислотность почвы, ранее вызванную внесением орг. удобрений. Зато на варианте *Д* + 1NPK последствие не полностью компенсирует подкисляющий эффект мин. удобрений, поэтому ЕКО чуть выше, чем на варианте *Д* + орг. фон за счет снижения S и повышения Нг.

Обменные катионы, особенно поливалентные, такие как Ca^{2+} , Al^{3+} , выступают в качестве связующих мостиков между гумусовыми кислотами и поверхностью почвенных частиц. Это сопровождается образованием органоминеральных адсорбционных комплексов, играющих важную роль в формировании ППК. Насыщение ППК одновалентными катионами сопровождается увеличением заряда коллоидов и растворением гумусовых соединений, что ведет к дегумификации почвы и, как следствие, снижению емкости катионного обмена.

Установлено, что удобрения существенно подкисляют чернозем выщелоченный. Данные по определению рН водной и солевой вытяжки в насыщенных почвенных пастах существенно ниже, чем в стандартных. Дефекат даже в последствии стабилизирует и поддерживает кислотность в оптимальном диапазоне.

В главе 4 представлены результаты определения влияния удобрений и дефеката на содержание различных форм фосфора.

Многие исследователи отмечают необходимость регулирования биологического круговорота веществ в агроценозах (Д.Н. Прянишников и др.). Содержание элементов питания является заметно регулируемым параметром. Применение удобрений и дефеката оказывает прямое влияние на содержание и соотношение минеральных и органических форм фосфора. Для органических форм Р характерна довольно высокая подвижность в почве. Это определяется свойствами его мин. и орг. форм. Ведь минеральные соли фосфора закрепляются главным образом в зоне их внесения или соприкосновения с почвой, а орг. фосфор в форме глюкозофосфатов и глицерофосфатов может перемещаться по профилю.

В проведенном исследовании определяли различные формы фосфора – общий, минеральный и органический в метровой толще по методу Сендерса-Вильямса, когда процесс окисления выполняется в муфельной печи. Мы считаем, что данный метод гарантирует полноту окисления органического вещества, в отличие от метода Карпинского-Замятиной. В своей работе мы отдаем предпочтение методу Сендерса-Вильямса как более экспрессному, менее трудоем-

кому и позволяющему получать хорошо воспроизводимые результаты.

Как следует из полученных нами данных (см. табл.), содержание всех форм фосфора весьма изменчиво как во времени, так и по профилю изучаемой почвы. Так, содержание общего фосфора в пахотном слое варьирует от 207 до 916 мг/кг почвы, а по профилю от 78 до 916 мг/кг почвы.

Влияние систем применения удобрения и дефекаата на содержание различных форм фосфора, мг/кг P₂O₅

Варианты опыта	Слой, см	Фосфор общий, мг/кг						Фосфор минеральный, мг/кг						Фосфор органический, мг/кг					
		2015	2016	2017	2018	2019	2020	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Контроль	0–20	252	712	522	562	207	330	211	259	211	167	193	237	41	453	311	395	14	93
	20–40	220	690	413	518	155	250	146	187	205	164	122	235	74	503	208	354	33	15
	40–60	172	562	460	355	191	272	126	171	126	117	126	246	46	391	334	238	67	26
	60–80	134	456	343	252	215	255	121	228	103	114	126	248	13	228	240	138	89	7
	80–100	174	435	228	217	243	283	98	187	102	105	141	246	76	248	226	112	102	37
Фон орг.	0–20	296	804	610	459	293	355	250	361	252	189	231	285	46	443	358	270	62	70
	20–40	404	722	550	405	267	394	141	270	146	157	119	330	263	452	404	248	148	64
	40–60	367	700	404	294	237	296	148	218	141	117	122	274	219	482	363	177	115	22
	60–80	150	456	342	231	289	252	100	226	126	105	131	194	50	230	216	126	158	58
	80–100	228	419	281	265	276	194	136	228	133	105	143	172	92	291	148	160	133	22
Фон + 1NPK	0–20	363	850	624	602	320	506	257	352	285	235	217	318	106	498	339	367	103	188
	20–40	244	570	684	435	307	344	218	241	267	171	129	254	26	329	417	264	178	90
	40–60	169	469	427	289	276	228	133	204	136	131	112	169	36	265	281	158	164	59
	60–80	134	438	363	259	307	244	114	211	121	103	100	204	20	227	242	156	207	40
	80–100	146	440	333	233	217	276	78	244	128	124	136	167	68	196	205	109	81	109
Фон + 2NPK	0–20	357	916	776	634	283	516	276	438	309	250	248	326	11	478	467	304	35	190
	20–40	346	726	750	569	259	307	239	326	268	274	133	237	107	400	482	295	126	70
	40–60	313	402	536	409	280	350	300	198	133	148	114	193	13	204	403	261	166	157
	60–80	309	465	335	252	250	278	276	224	124	100	100	217	33	241	211	152	150	61
	80–100	355	410	304	235	207	241	235	205	112	103	187	198	120	205	192	132	20	43
Фон + Д	0–20	270	806	570	502	335	318	246	357	233	189	202	300	24	449	367	313	133	18
	20–40	244	664	566	454	296	259	218	244	146	145	187	211	26	420	420	309	109	48
	40–60	233	556	427	217	278	307	169	243	124	100	121	143	64	313	303	117	157	164
	60–80	204	522	421	248	209	305	133	211	121	109	95	136	71	311	300	139	114	169
	80–100	235	394	355	107	171	204	128	276	141	79	105	171	107	118	214	28	66	33
Д + 1NPK	0–20	415	802	600	241	396	386	280	350	259	213	205	365	135	452	341	28	191	21
	20–40	392	558	298	289	280	315	226	224	110	171	114	280	166	334	188	118	166	35
	40–60	261	438	465	348	315	367	146	233	133	128	124	187	115	205	332	220	191	180
	60–80	254	604	413	257	305	324	152	250	121	119	134	165	102	354	292	138	171	159
	80–100	243	552	350	261	298	333	146	243	90	109	115	143	97	309	260	152	183	190

Внесение органических и минеральных удобрений повышает содержание общего фосфора, особенно при повышении дозы последних. На вариантах с Д, где мы наблюдаем его последствие, содержание общего фосфора остается, как правило, выше, чем на контроле. Характер распределения общего фосфора по профилю преимущественно элювиально-иллювиальный, однако, степень дифференциации его неодинакова на вариантах опыта.

Минимальное содержание общего фосфора в пахотном слое наблюдалось в 2019 г. под сахарной свеклой, что связано с его высоким отчуждением с урожаем. Максимальное содержание общего фосфора наблюдалось в 2016 г. под ячменем. Общей закономерностью является существенное повышение содержания общего фосфора при внесении орг. и мин. удобрений и стабилизация его содержания на вариантах с дефекаатом.

Содержание общего фосфора очень резко изменяется во времени и пространстве. Так, в пахотном слое варианта К его содержание находилось в диапазоне 207–712 мг/кг, а среднее за наблюдаемый период составляло 431 мг/кг.

На варианте *ОСУ* его содержание изменялось в пределах 293–804 мг/кг, а среднее составляло 465 мг/кг, т.е. было выше, чем на абсолютном контроле. На варианте *ОМСУ + 1NPK* и *ОМСУ + 2NPK* содержание общего фосфора изменялось соответственно в пределах 320–850 и 283–916 мг/кг, при средних значениях – 544 и 580 мг/кг. Наиболее наглядно содержание и характер распределения общего фосфора по профилю показаны на рисунке 6.

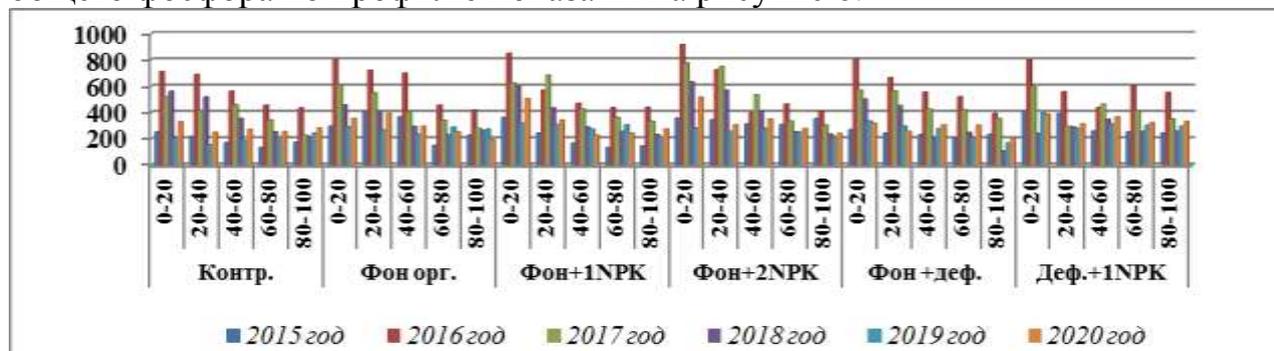


Рисунок 6 – Содержание и характер распределения общего фосфора по профилю, мг/кг P_2O_5 (HCP_{05} 170,8)

На вариантах *Д + орг. фон* и *Д + 1NPK* содержание общего фосфора значительно изменялось в пределах 270–806 и 241–802 мг/кг, а среднее содержание составляло 467 и 473 мг/кг соответственно, т.е. было выше, чем на варианте *ОСУ*. Внесение органических, органоминеральных удобрений, дефеката по орг. фону и *Д + 1NPK* повышает амплитуду колебаний содержания общего фосфора относительно контроля на 1,2, 4,9, 25,1, 6,1 и 11,1% соответственно.

Общий фосфор представлен в почве многочисленными минералами, имеющими различную степень дисперсности. Количество их неравномерно распределяется по гранулометрическим фракциям. Нами выполнен корреляционный анализ по выявлению связи общего фосфора с гранулометрическими фракциями. Установлено, что на варианте *К* связь содержания общего фосфора с фракцией крупного и среднего песка преимущественно тесная ($r = 0,711-0,962$) в 2015–2018 гг. и слабая отрицательная и средняя в 2019 и 2020 гг. соответственно. С фракцией мелкого песка связь отрицательная и колеблется от слабой в 2017 г. до тесной в 2015 г., в 2019 и 2020 гг. она отсутствует. Связь содержания общего фосфора с фракциями крупной и средней пыли преимущественно тесная, а с фракцией тонкой пыли отсутствует. Связь с содержанием ила преимущественно средняя и тесная, а с физической глиной она преимущественно средняя и тесная отрицательная.

В целом по сравнению с контролем *ОСУ* и *ОМСУ* оказывают существенное влияние на характер связи общего фосфора с гранулометрическими фракциями. Если на вариантах *ОСУ* и *ОМСУ + 1NPK* повышается связь общего фосфора с тонкодисперсными фракциями, то с двойной дозой минеральных удобрений она высокая практически со всеми фракциями. На варианте внесения *Д* по орг. фону высокая связь содержания органического фосфора только с пылеватыми фракциями, а на варианте *Д + 1NPK* – высокая с грубо- и тонкодисперсными фракциями.

На рисунке 7 представлены данные по содержанию и характеру распреде-

ления по профилю минерального фосфора.

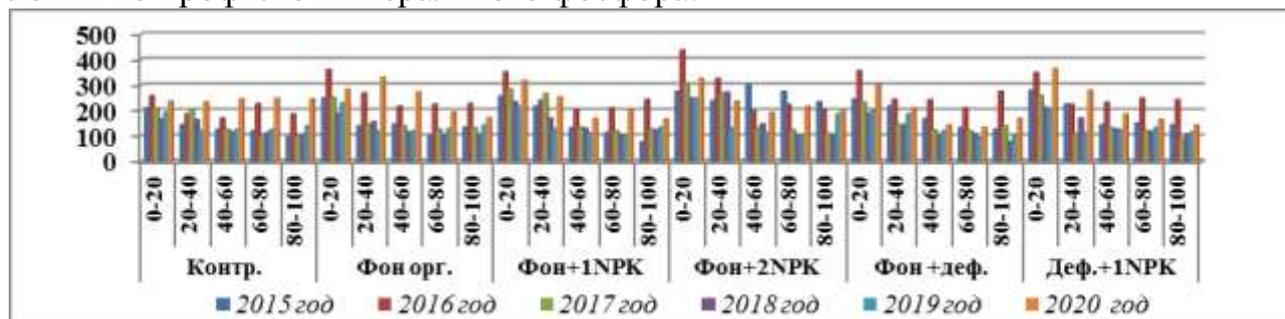


Рисунок 7 – Содержание и характер распределения по профилю минерального фосфора, мг/кг P_2O_5 , (НСР₀₅ 67,14)

В пахотном слое варианта *К* содержание минерального фосфора изменялось в пределах 167–259 мг/кг при среднем значении 213 мг/кг. На варианте *ОСУ*, *ОМСУ* + 1NPK и + 2NPK содержание этой формы фосфора находилось в пределах 189–361, 217–352 и 248–438 мг/кг соответственно при среднем содержании 261, 277 и 308 мг/кг, т.е. существенно выше, чем на варианте *К*. Таким образом, внесение орг. и органоминеральных удобрений существенно повысило содержание минерального фосфора не только в пахотном слое, но и по всему профилю изучаемой почвы. На вариантах *Д* + орг. фон и *Д* + 1NPK содержание минерального фосфора изменялось в пределах 189–357 и 205–365 мг/кг при средних значениях 254 и 279 мг/кг соответственно, т.е. было на уровне удобренных вариантов. И это при том, что мы наблюдаем последствие дефеката. Минимальное содержание минерального фосфора наблюдалось в 2017 и 2018 гг.

Внесение органических и минеральных удобрений способствует повышению содержания минерального фосфора. На вариантах с дефекатом содержание минерального фосфора в пахотном слое выше, чем на неудобренном варианте. Распределение минерального фосфора по профилю соответствует элювиально-иллювиальному типу. Общей закономерностью является повышение содержания минерального фосфора в слое 80–100 см, что обусловлено карбонатами, выполняющими роль геохимического барьера.

Установлено, что внесение органических, минеральных удобрений и дефеката обуславливает перераспределение минерального фосфора по гранулометрическим фракциям. Надо полагать, что и сами с.-х. культуры оказывают влияние на характер связи минерального фосфора с гранулометрическими фракциями. При всем различии их влияния есть некоторые общие закономерности. Для оценки корреляции минерального фосфора с гранулометрическими фракциями возьмем поле под паром. Это позволит выявить влияние удобрений и дефеката на связь минеральных фосфатов с гранулометрическими фракциями и исключить влияние с.-х. культур. Так, на варианте *К* и *ОСУ* выявлена очень сильная связь содержания минеральных фосфатов с фракцией крупного и среднего песка ($r = 0,972$ и $r = 0,906$), а с фракцией крупной пыли – высокая и средняя ($r = 0,858$ и $r = 0,694$) соответственно. С фракциями мелкого песка, ила и физической глиной она соответственно отрицательная высокая и средняя ($r = -0,846$ и $r = -0,590$), и высокая ($r = -0,832$ и $r = -0,807$), ($r = -0,754$ и $r = -0,701$).

На варианте *ОМСУ* + 1NPK связь минеральных фосфатов с фракцией крупного и среднего песка отсутствует, а с фракциями крупной и средней пыли

и ила высокая и очень высокая ($r = 0,812$, $r = 0,883$ и $r = 0,934$) соответственно. С внесением 2NPK корреляция резко меняется, установлена высокая связь минеральных фосфатов с фракцией крупного и среднего песка – $r = 0,802$, с фракцией средней пыли – средняя – $r = 0,557$, а с фракциями ила и физического песка – отрицательная очень высокая – $r = -0,962$ и $r = -0,987$ соответственно.

Совершенно различные связи выявлены на вариантах применения дефеката. Так, на варианте *Д* + орг. фон выявлена очень высокая связь содержания минеральных фосфатов с фракцией средней пыли $r = 0,903$ и высокая отрицательная с илом – $r = 0,790$. На варианте применения *Д* + 1NPK установлена высокая связь минеральных фосфатов с фракцией крупного и среднего песка – $r = 0,887$, средняя с фракциями тонкой пыли – $r = 0,522$ и средняя отрицательная с илом – $r = -0,518$.

Содержание и характер распределения по профилю органического фосфора представлены на рисунке 8.

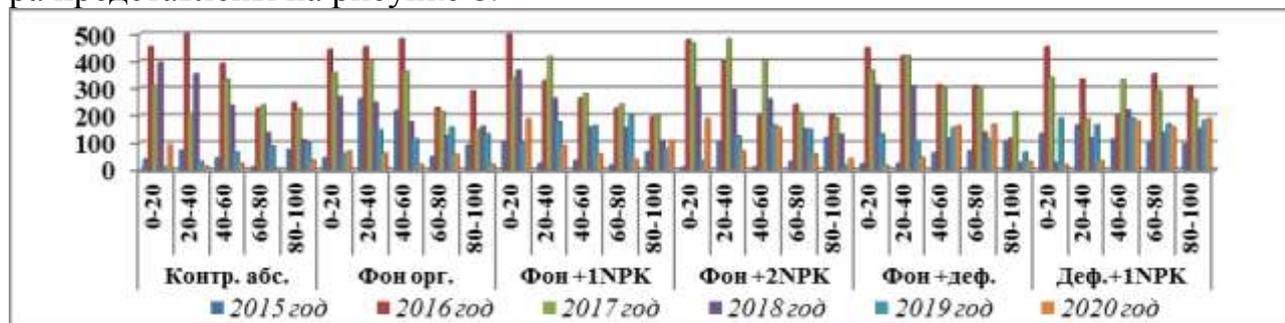


Рисунок 8 – Содержание и характер распределения по профилю органического фосфора, мг/кг P_2O_5

Как следует из полученных данных, органический фосфор преобладает в составе общего фосфора по всем годам наблюдений на всех вариантах опыта. Общей закономерностью является повышенное содержание органического фосфора в верхней части профиля, т.е. преимущественно в пределах гумусового горизонта, что вполне закономерно. Именно в этой части профиля размещается основная масса корней с.-х. культур. Минимальное содержание органического фосфора в пахотном слое наблюдалось в 2015 г. под озимой пшеницей, а максимальное в 2016 г. под ячменем, что обусловлено преимущественно условиями увлажнения этих лет. Так, 2015 г. был засушливым, ГТК активного вегетационного периода – 0,65, условия 2016 г. были близкими к нормальным, ГТК – 0,90. Более того, в начале активной вегетации в мае ГТК в 2015 г. был 0,44, а в 2016 г. – 1,59, т.е. избыточно влажным, что кардинальным образом повлияло на урожайность озимой пшеницы и ячменя.

Высокое содержание органического фосфора наблюдалось в пределах гумусового слоя за период 2016–2018 гг. на всех вариантах за исключением вариантов с дефекатом. Так, на варианте *Д* + орг. фон за этот период высокое содержание органического фосфора наблюдалось в слое 0–80, а не 0–60 см, и профиль этого варианта был наименее дифференцирован по содержанию этой формы фосфора. На варианте *Д* + 1NPK за этот же период высокое содержание органического фосфора наблюдалось практически по всему профилю. Содержание органического фосфора в пахотном слое варианта *К* изменялось в пределах 14–453 мг/кг при среднем значении за период наблюдений 218 мг/кг. На варианте *ОСУ* содержание этой формы фосфора варьировало в пределах 46–443 мг/кг

при среднем значении 208 мг/кг. На вариантах *ОМСУ* + 1НПК и *ОМСУ* + 2НПК содержание органического фосфора изменялось в пределах 103–498 и 11–478 мг/кг при средних значениях соответственно 267 и 249 мг/кг. На вариантах *Д* + орг. фон и *Д* + 1НПК содержание этой формы фосфора изменялось в пределах 18–449 и 21–452 мг/кг при средних значениях соответственно 217 и 195 мг/кг, т.е. на уровне вариантов *К* и *ОСУ*.

Расчет коэффициентов корреляции показывает, что на вариантах *К* и органического фона связи содержания органофосфатов с фракциями средней и тонкой пыли нет или она слабая. На варианте *ОМСУ* + 1НПК связь органофосфатов с фракциями средней пыли варьирует в пределах от средней до очень высокой – $r = 0,516-0,937$, а с тонкой пылью она слабая или отсутствует. На варианте *ОМСУ* + 1НПК связь органофосфатов с фракциями средней пыли варьирует в пределах от средней до высокой – $r = 0,546-0,821$, а с тонкой пылью она средняя отрицательная – $r = -0,434-0,570$. На варианте *Д* + орг. фон установлена слабая и средняя связь органофосфатов с фракцией средней пыли – $r = 0,446-0,670$, а с тонкой пылью она варьирует от слабой до сильной $r = 0,562-0,872$. На варианте *Д* + 1НПК связи органофосфатов с фракцией средней пыли нет или она слабая, а с тонкой пылью варьирует от слабой до очень сильной – $r = 0,300-0,954$.

Полученные нами данные позволяют сделать заключение об устойчивом повышении содержания всех форм фосфора при применении различных систем удобрения и дефеката. В годы с дефицитом увлажнения в составе общего фосфора преобладают минеральные формы, а при нормальном увлажнении или близком к нему накапливаются преимущественно органофосфаты.

В практике агрохимической службы определяют содержание подвижного фосфора, для чего используются различные экстрагенты при разном соотношении почва : экстрагент и разной экспозиции. Определенные разными методами результаты могут быть несопоставимыми. Между тем растениям наиболее доступны органофосфаты. Они-то, как правило, не определяются. Содержание органофосфатов очень динамично во времени и пространстве и зависит от количества органики. Подвижный фосфор можно определять различными методами: Олсена, Брейя-Куртца, Кирсанова, Мачигина, Чирикова и др. В наших исследованиях использовали методы Чирикова и Брейя-Куртца, т.к. с их помощью извлекаются подвижные формы фосфора, поэтому их сравнение вполне корректно.

Для извлечения подвижных форм фосфора мы использовали стандартный для слабокислых почв метод Чирикова. Подобный подход позволяет нам выполнить сравнение стандартного метода с методом Брейя-Куртца. Это сравнение уместно, т.к. позволяет выявить влияние широкого отношения почва : раствор по методу Чирикова (1 : 25) с узким по методу Брейя-Куртца (1 : 7).

Характер распределения подвижного фосфора по профилю наглядно иллюстрируют данные рисунка 9, на котором видно, что содержание подвижного фосфора по годам наблюдений сильно различается. В пахотном слое варианта *К* содержание подвижного фосфора изменяется в пределах 102–172 мг/кг при среднем содержании 146 мг/кг. На варианте *ОСУ* содержание подвижного фосфора изменяется в пределах 109–250 мг/кг при среднем значении 148 мг/кг. При варьировании в более широких пределах на этом варианте среднее содержание подвижного фосфора практически сравнимо с таковым на контроле, что связа-

но с большим выносом фосфора на этом варианте (Рисунок 9).

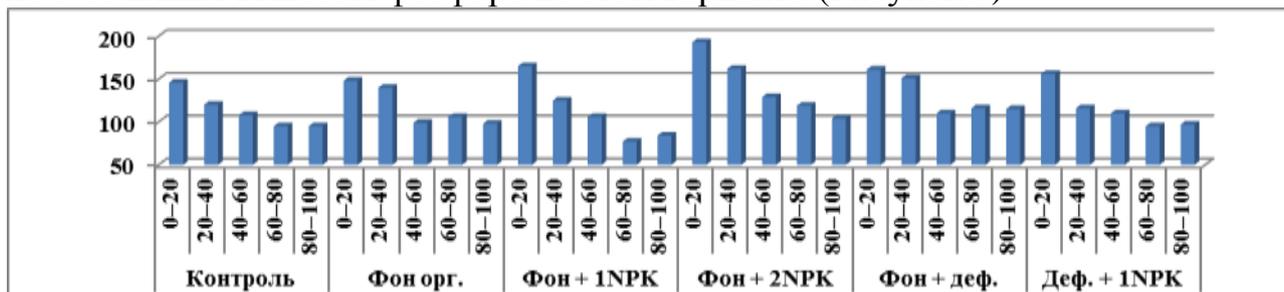


Рисунок 9 – Влияние систем применения удобрения и дефеката на содержание подвижного фосфора по Чирикову, мг/кг P₂O₅ (НСР₀₅ 49,29)

На вариантах *ОМСУ* + 1NPK и *ОМСУ* + 2NPK содержание подвижного фосфора изменяется в пределах 95–268 и 145–274 мг/кг при средних значениях 165 и 193 мг/кг соответственно. Можно сделать вывод, что *ОМСУ* не только повышает урожаи выращиваемых с.-х. культур, но и обеспечивает более высокое содержание подвижного фосфора в пахотном слое изучаемой почвы. На вариантах *Д* + орг. фон и *Д* + 1NPK содержание подвижного фосфора в пахотном слое изменяется в пределах 138–213 и 112–193 мг/кг при средних значениях 161 и 156 мг/кг соответственно. Как следует из полученных нами данных, даже в последствии дефекат обуславливает более высокое содержание подвижного фосфора в изучаемой почве.

Аккумуляция подвижного фосфора в слое 40–60 см обусловлена дифференциацией профиля почвы по содержанию тонкодисперсных гранулометрических фракций. В большинстве случаев на удобренных вариантах и на вариантах применения дефеката содержание подвижного фосфора выше, чем на варианте *К*. Как установил В.Д. Муха, повышение общего содержания и степени подвижности фосфора в почвенном профиле является характерным показателем развития культурного почвообразования. Для учета интенсивности и направленности процессов, определяющих фосфатный режим почв, В.Д. Муха предложил показатель характера фосфорного режима (Пр), определяемый как произведение коэффициентов изменения валового содержания фосфора (Кр) и степени подвижности фосфора (КСПр): $Пр = Кр \times КСПр$. Величина КСПр, по сути, показывает долю подвижного фосфора от валового содержания ($КСПр = P_{подв}/P_{общ} \times 100$).

Величина КСПр по вариантам опыта варьирует в очень широком диапазоне (Рисунок 10).

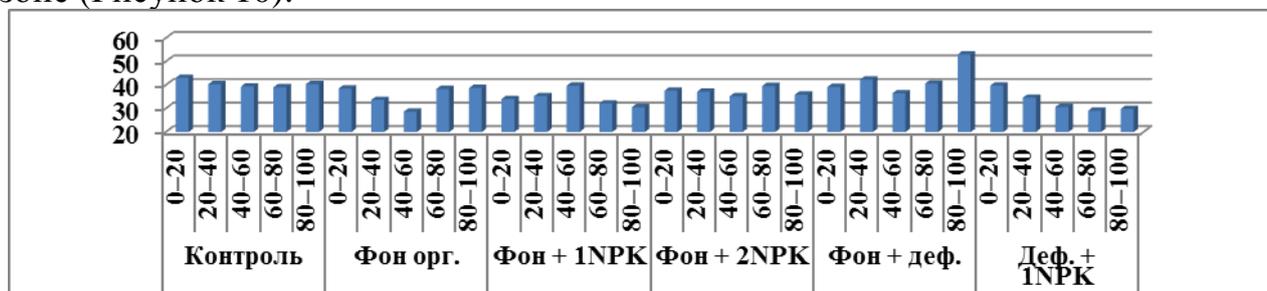


Рисунок 10 – Влияние систем удобрения и дефеката на величину КСПр

В пахотном слое контрольного варианта она находится в пределах 14,3–78,3, или в среднем 30,5. На варианте *ОСУ* величина КСПр находилась в пределах 13,6–84,5, в среднем – 38,5, на вариантах *ОМСУ* + 1NPK и *ОМСУ* + 2NPK – в

пределах 14,3–72,2 и 17,9–53,5 соответственно, в среднем – 34,0 и 37,5, на вариантах *Д* + орг. фон и *Д* + 1NPK – в пределах 18,4–60,0 и 18,7–80,1, в среднем – 39,1 и 39,7 соответственно. Полученные данные позволяют сделать вывод о том, что систематическое применение удобрений и дефеката существенно повышает долю подвижного фосфора. Но это распространяется не только на пахотный слой, но и на весь профиль, что наглядно показано на рисунке 10. Величина КСПр за годы наблюдений была неодинаковой под различными с.-х. культурами. Величина КСПр была максимальной в 2015 г. под озимой пшеницей на вариантах *К*, *ОСУ* и *ОМСУ* + 1NPK. Остальные варианты опыта были или близки к контролю, или ниже (варианты с *Д*). Минимальной величина КСПр была под ячменем, при этом только на вариантах *ОМСУ* + 2NPK и внесения *Д* она была выше, чем на варианте *К*. Следует отметить, что в слое 0–40 см варианта *К* величина КСПр в 2019 и 2020 гг. была выше, чем на вариантах с *Д*. Распределение величины КСПр по профилю соответствует преимущественно элювиально-иллювиальному типу.

Проводилось определение влияния систем применения удобрения и дефеката на содержание и характер распределения по профилю обменных и подвижных форм фосфора по методу Брейя-Куртца. Характер распределения по профилю подвижного и обменного фосфора представлен на рисунке 11.

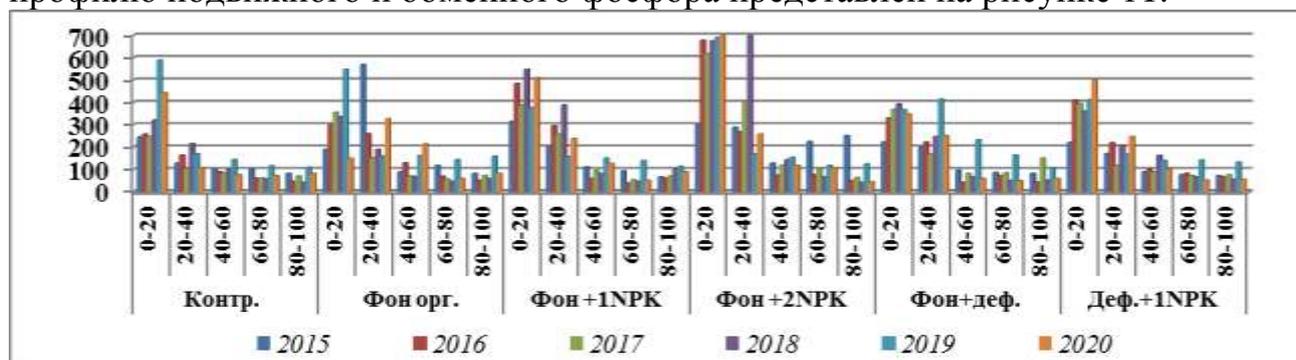


Рисунок 11 – Изменение содержания подвижного и обменного фосфора, мг/кг P_2O_5 , (НСР₀₅ 93,72)

Содержание обменных и подвижных форм фосфора чрезвычайно сильно варьирует как по годам наблюдений, так и по вариантам опыта. На варианте *К* в пахотном слое содержание обменных и подвижных форм фосфора изменялось в пределах 246–590 мг/кг при среднем значении 352 мг/кг. На варианте *ОСУ* содержание этих форм фосфора изменялось в пахотном слое в пределах 150–548 мг/кг при среднем содержании 314 мг/кг, т.е. ниже, чем на варианте *К*. На вариантах *ОМСУ* + 1NPK и *ОМСУ* + 2NPK содержание обменных и подвижных форм фосфора варьирует в очень широких пределах – 315–548 и 302–706 мг/кг при среднем содержании 437 и 612 мг/кг соответственно. Как следует из полученных нами данных, *ОМСУ* не только существенно повышала урожай с.-х. культур, но и содержание обменных и подвижных форм фосфора. На вариантах *Д* + орг. фон и *Д* + 1NPK содержание обменных и подвижных форм фосфора в пахотном слое изменялось в пределах 224–394 и 222–502 мг/кг при средних значениях 339 и 384 мг/кг соответственно, т.е. ниже, чем на варианте *К*. На контроле и удобренных вариантах распределение подвижного и обменного фосфора преимущественно элювиально-иллювиальный, а на вариантах с дефекатом – прогрессивно убыва-

ющий. Повышение содержания этих форм фосфора в слое 80–100 см обусловлено появлением карбонатов, выполняющих роль геохимического барьера.

Характер распределения по профилю подвижного фосфора, определенного по методу Чирикова, и подвижного и обменного фосфора, определенных по методу Брейя-Куртца, представлен на рисунке 12.

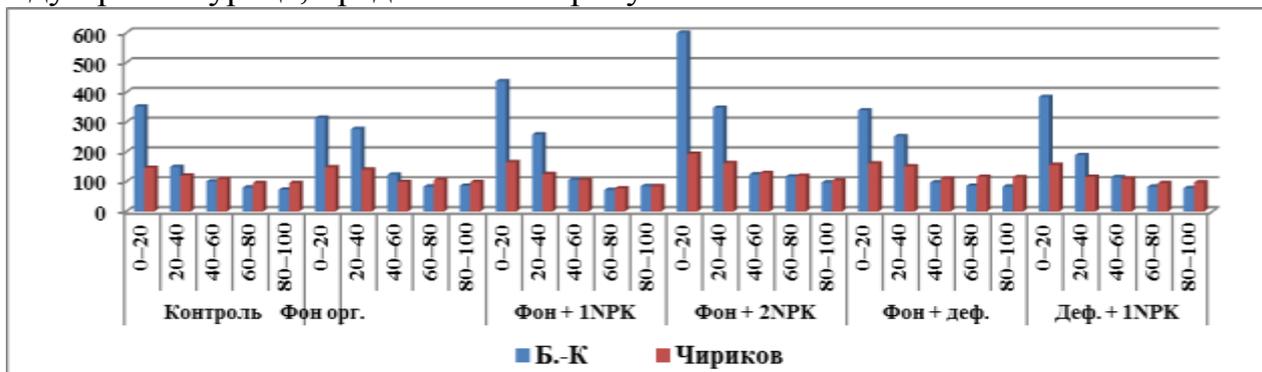


Рисунок 12 – Содержание подвижного фосфора, определенного по методу Чирикова, и подвижного и обменного фосфора, определенных по методу Брейя-Куртца, мг/кг P₂O₅

Установлено, что по методу Чирикова из верхних слоев изучаемой почвы извлекается в 1,5–5 раз меньше подвижного фосфора, чем по методу Брейя-Куртца, что обусловлено тем, что последним методом извлекаются еще и обменные формы фосфора. Однако, начиная со слоя 40–60 см, закономерность принимает обратный характер, по методу Чирикова извлекается больше подвижного фосфора, чем по методу Брейя-Куртца. Основной причиной может быть активное взаимодействие фторида аммония с почвенным кальцием, в результате которого образуется нерастворимый осадок CaF₂ – флюорит. Именно поэтому минимальное количество изучаемых форм фосфора извлекается в слое 80–100 см, где появляются морфологически выделенные формы кальция. Подтверждением этому является появление осадка на стенках колб, в которых производится экстрагирование. Максимальное количество подвижного и обменного фосфора извлекается на удобренных вариантах опыта. Следует отметить, что указанным экстрагентом на вариантах с дефекатом извлекается чаще всего больше фосфора, чем на неудобренных вариантах опыта.

В отличие от подвижного фосфора, содержание которого выше, как выше и пределы варьирования, ортофосфаты в изучаемой почве находятся существенно в меньшем количестве. Так, на варианте *K* в пахотном слое содержание ортофосфатов изменяется в пределах 26–83 мг/кг при среднем содержании 51 мг/кг (Рисунок 13).

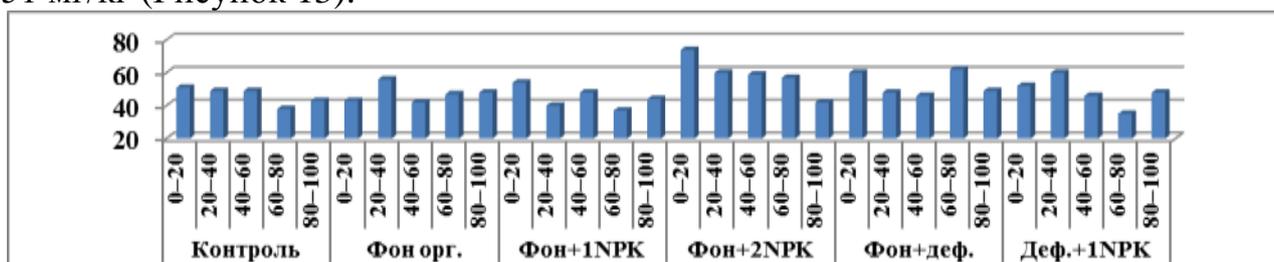


Рисунок 13 – Влияние систем применения удобрения и дефеката на содержание и характер распределения по профилю ортофосфатов, мг/кг P₂O₅ (НСР₀₅ 20,41)

На варианте *ОСУ* содержание ортофосфатов было ниже, чем на варианте *K*

и варьировало в более узком пределе – 38–53 мг/кг при среднем содержании 43 мг/кг. На вариантах *ОМСУ* + 1НПК и *ОМСУ* + 2НПК содержание ортофосфатов в пахотном слое изменялось в пределах 41–62 и 40–107 мг/кг при среднем содержании 54 и 74 мг/кг соответственно, т.е. выше, чем на вариантах *К* и *ОСУ*. На варианте *Д* + орг. фон и *Д* + 1НПК содержание ортофосфатов в пахотном слое изменялось в пределах 28–93 и 31–71 мг/кг при среднем содержании 60 и 52 мг/кг соответственно. Содержание ортофосфатов на вариантах с дефекатом выше, чем на *К* и *ОСУ*. Распределение ортофосфатов по профилю на всех вариантах было преимущественно элювиально-иллювиальное.

Расчет коэффициентов корреляции показывает, что между всеми формами фосфора, определенными как по методу Чирикова, так и по методу Брейя-Куртца, есть различия по тесноте связи по всем годам наблюдений. Во всех случаях теснота связи всех форм фосфора с подвижным и обменным фосфором, определенным по методу Брейя-Куртца, существенно выше, чем по методу Чирикова.

Степень обеспеченности растений фосфором определяется фактором буферности, это характеризует способность почвы поддерживать концентрацию фосфора на определенном уровне, т.е. противостоять изменению ее фосфатного потенциала. По Беккету и Уайту, эта способность называется «потенциальной буферной способностью» в отношении фосфатов – РВСП, численно она равна:

$$РВСП = Q/I,$$

где *Q* – общий запас подвижных фосфатов почвы («фактор емкости»);

I – равновесная активность H_2PO_4 , или равновесный фосфатный потенциал почв («фактор интенсивности» по Карпинскому и Замятиной).

Чем больше *Q/I*, тем сильнее выражена способность почвы поддерживать концентрацию фосфора в растворе на постоянном уровне. РВСП учитывает не только общее содержание подвижных фосфатов в почвах, но и степень их подвижности, зависящей от поглотительной способности почвы, поэтому этот показатель более полно характеризует фосфатный режим почв. Оптимальному для большинства с.-х. культур фосфатному режиму соответствует концентрация в почвенном растворе или слабосолевых вытяжках 0,2–0,3 мг/л фосфора.

Определение РВСП нами выполнено по отношению подвижного фосфора – «фактора емкости», определенного по методу Чирикова и Брейя-Куртца, к ортофосфатам – «фактору интенсивности», определенному по Карпинскому и Замятиной. Так как оценку физико-химических показателей выполняют по пахотному слою, мы оценивали РВСП подобным же образом. Так, на варианте *К* величина РВСП изменялась в пределах 1,96–5,50 при среднем значении 3,30. На варианте *ОСУ* величина РВСП варьирует в пределах 2,42–6,25 при среднем значении 3,53. На вариантах *ОМСУ* + 1НПК и *ОМСУ* + 2НПК и вариантах *Д* + орг. фон и *Д* + 1НПК величина РВСП изменялась в пределах 2,32–5,06, 1,78–6,85, 1,48–7,61 и 2,72–4,84 при средних значениях 3,05, 3,01, 3,34 и 3,19 соответственно.

Как следует из полученных нами данных, средняя величина РВСП максимальна на варианте *ОСУ*, а на вариантах с дефекатом она выше, чем на вариантах с *ОМСУ*. Оптимальная величина РВСП около 7 не превышена в пахотном слое изучаемой почвы ни на одном из вариантов. Но в отдельных горизонтах разных вариантов наблюдаются очень высокие величины РВСП, как например,

на варианте *K* в 2017 г. в слое 60–80 см она достигает 17,29, а на варианте *ОСУ* в 2015 г. в слое 40–60 см – 12,60.

На рисунке 14 приведены данные определения величины РВСП, в качестве фактора емкости использованы результаты определения содержания подвижного и обменного фосфора по методу Брейя-Куртца. С учетом того, что по данному методу количество извлекаемого фосфора из верхнего слоя 0–40 см выше, чем по методу Чирикова, величина РВСП повышенная, зато в нижних горизонтах закономерность носит обратный характер.

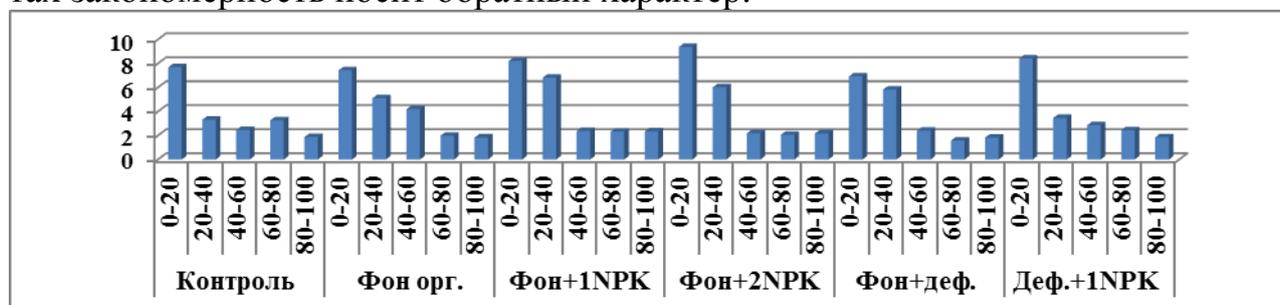


Рисунок 14 – Средние величины РВСП за ротацию севооборота (НСП₀₅ 2,75)

Установлено, что в пахотном слое на контроле величина РВСП изменялась в пределах 4,95–14,75 при среднем значении 7,68; на варианте *ОСУ* – в диапазоне 3,75–13,70 при среднем значении 7,42. На вариантах *ОМСУ* + 1NPK и *ОМСУ* + 2NPK величина РВСП изменялась в пределах 5,94–9,64 и 2,82–15,50, при средних значениях 8,20 и 9,37 соответственно. На вариантах *Д* + орг. фон и *Д* + 1NPK величина РВСП варьировала в широком диапазоне 2,67–13,21 и 3,31–13,26 при средних значениях 6,92 и 8,41 соответственно.

Выявлено, что оптимальная величина РВСП около 7 превышена, судя по средним значениям, практически на всех вариантах за исключением варианта применения дефеката по органическому фону. Однако это обусловлено, прежде всего, тем, что по данному методу, в отличие от метода Чирикова, извлекаются две формы фосфора – обменные и подвижные. В пахотном слое вариантов *K* и *ОСУ* и *Д* + орг. фон отмечено превышение в два раза за 6 лет, а на вариантах *ОМСУ* + 1NPK – в 4 раза и *ОМСУ* + 2NPK – в 5 раз. Считаем, что величина РВСП, определенная по методу Брейя-Куртца, более предпочтительна, т.к. учитывает две доступные растениям формы фосфора, а не только подвижные формы, как по методу Чирикова. Это обстоятельство является важным: именно обменные формы фосфора являются наиболее доступными для растений.

Установлено, что применяемые в опыте системы удобрения и дефекат устойчиво повышают «потенциальную буферную способность» в отношении фосфатов – РВСП и поддерживают ее на более высоком уровне по сравнению с контролем.

В главе 5 приводятся данные о влиянии систем применения удобрения и дефеката на урожайность сельскохозяйственных культур и энергетическую эффективность.

Урожай с.-х. культур является реакцией на почвенные условия и культуру земледелия. Варианты опыта довольно значительно различаются по уровню плодородия. В наибольшей степени это проявляется на культурах, создающих значительную биомассу, – зерновых, сахарной свекле, культурах на зеленый

корм. В нашем случае мы приводим данные по урожайности озимой пшеницы, ячменя и сахарной свеклы.

Выявлено, что максимальная прибавка урожая ячменя – 1,61 т/га получена на варианте *Д* + 1NPK, а минимальная на варианте *Д* + орг. фон – 0,05 т/га. Удвоение дозы минеральных удобрений не дает резкого увеличения урожая ячменя, прибавка урожая возрастает всего на 0,41 т/га. Максимальная прибавка урожая озимой пшеницы – 2,03 т/га получена на варианте *ОМСУ* + 2NPK, а минимальная – на варианте *ОСУ* – 0,79 т/га. Как видим, удвоение дозы минеральных удобрений не обуславливает резкого (до удвоения) повышения урожая озимой пшеницы, прибавка урожая возрастает всего на 0,23 т/га.

Максимальная урожайность сахарной свеклы получена на варианте *ОМСУ* + 2NPK – 11,6 т/га, а минимальная на варианте *Д* + орг. фон – 3,8 т/га. Как и в случае с ячменем и озимой пшеницей, удвоение дозы минеральных удобрений не приводит к резкому повышению урожая сахарной свеклы. Прибавка урожая возрастает всего на 0,5 т/га.

Считаем необходимым учитывать то, что на варианте *Д* + орг. фон мы наблюдаем его последствие, а на варианте *Д* + 1NPK мы наблюдаем последствие дефеката и дозы минеральных удобрений. Тем не менее, прибавка урожая от последствия 1NPK в 2,7 раза выше последствия самого дефеката. Скорее всего, в данном случае мы имеем дело с проявлением синергизма, когда происходит сложение эффектов последствия дефеката и минеральных удобрений. Выявленные закономерности наглядно представлены на рисунке 15.

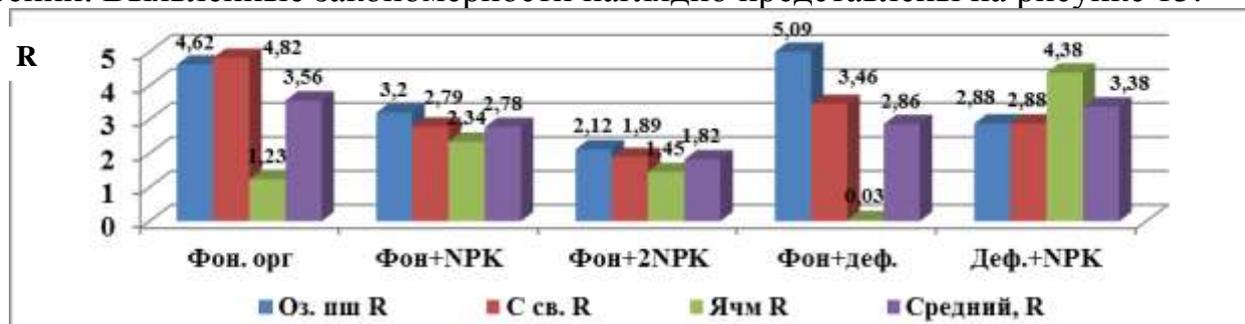


Рисунок 15 – Энергетическая эффективность удобрений и дефеката в опыте

Максимальная энергетическая эффективность наблюдается на варианте *ОСУ* – $R = 3,56$, незначительно ниже она на варианте *Д* + 1NPK – $R = 3,38$. Удвоение дозы минеральных удобрений на варианте *ОСУ* снижает энергетическую эффективность по озимой пшенице с 2,78 до 1,82, т.е. в 1,5 раза. Это снижение наблюдается в посевах сахарной свеклы и ячменя. Максимальная энергетическая эффективность применения удобрений и дефеката отмечена по озимой пшенице – $R = 3,58$, а минимальная – по ячменю – $R = 1,89$.

Установлено, что в принципе все три культуры отзывчивы на удобрения и дефекат. Только очень низкая прибавка по ячменю на варианте *Д* + орг. фон несколько искажает общую закономерность. Ведь на варианте *Д* + 1NPK мы видим резкий рост энергетической эффективности по ячменю, очень отзывчивой культуры на внесение удобрений.

Считаем очень убедительным фактом резкий рост энергетической эффективности всех культур на вариантах применения дефеката по сравнению с удобренными вариантами и особенно с *ОМСУ*. Озимая пшеница и сахарная

свекла очень чувствительны к реакции среды, а на вариантах внесения дефеката она была наиболее благоприятной во все года наблюдений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Длительное применение различных систем удобрений повлекло за собой значительное подкисление чернозема выщелоченного в условиях Окско-Донской равнины. Последствие дефеката не только компенсирует агрогенное подкисление почвы, но и стабилизирует физико-химические свойства и режим фосфора на оптимальном уровне.

2. Внесение органических, минеральных удобрений и дефеката, как правило, способствует повышению содержания общего фосфора. Если на варианте контроля и органического фона накапливается преимущественно органический фосфор (относительно общего фосфора), то на вариантах с минеральными удобрениями – минеральный фосфор.

3. Доказано, что применение дефеката и научно обоснованных систем применения удобрений повышает содержание всех форм фосфора. В годы с дефицитом увлажнения в составе общего фосфора преобладают минеральные формы, а при нормальном увлажнении или близком к нему – преимущественно ортофосфаты. На вариантах применения дефеката относительное накопление ортофосфатов более выражено по сравнению со всеми другими вариантами. В отдельные годы на варианте *Д* + 1NPK в пахотном слое содержание минерального фосфора несколько выше, чем органического, но вниз по профилю доля последнего заметно возрастает, что связано с повышением рН и связыванием подвижных форм фосфора.

4. Содержание обменного фосфора и ортофосфатов очень изменчиво как по вариантам опыта, так и по годам наблюдений. В пахотном слое варианта *К* содержание изучаемых форм фосфора варьирует в пределах 21–55 мг/кг почвы при среднем содержании 41 мг/кг почвы, амплитуда колебаний – 34 мг/кг.

5. Внесение органических удобрений повышает содержание обменного фосфора и ортофосфатов до 24–67 мг/кг при среднем содержании 52 мг/кг, амплитуда колебаний – 43 мг/кг.

Дозы NPK по 60 кг д.в. на 1 га, вносимые по орг. фону, повышают содержание всех форм фосфора до 35–92 мг/кг, а среднее их количество достигает 67 мг/кг, амплитуда колебаний – 57 мг/кг. Внесение NPK по 120 кг д.в. на 1 га по орг. фону повышает содержание обменного фосфора и ортофосфатов до максимального количества по всем годам наблюдений, за исключением 2018 г. Оно варьирует в пределах 47–82 мг/кг при среднем содержании 68 мг/кг, амплитуда колебаний – 35 мг/кг. Среднее содержание этих форм фосфора за ротацию севооборота практически одинаково на вариантах внесения 1NPK и 2NPK по орг. фону, что можно объяснить внесением фосфора как по орг. фону, так и совместно с минеральными удобрениями.

6. На вариантах применения дефеката содержание обменного фосфора и ортофосфатов выше, чем на абсолютном контроле и сравнимо с таковым на варианте орг. фона. На варианте *Д* + орг. фон содержание обменного фосфора и ортофосфатов в пахотном слое варьировало в пределах 28–93 мг/кг при среднем содержании 60 мг/кг, амплитуда колебаний – 65 мг/кг.

На варианте *Д* + 1NPK содержание изучаемых форм фосфора в пахотном слое изменялось в пределах 21–67 мг/кг при среднем содержании 52 мг/кг, амплитуда колебаний – 46 мг/кг. Соответственно на вариантах орг. фон, контроль, *Д* + 1NPK, орг. фон + 1NPK, орг. фон + *Д*, орг. фон + 2NPK, содержание изучаемых форм фосфора образует следующий ряд: 43, 51, 52, 54, 60 и 74 мг/кг почвы при НСР 20,41 мг/кг, т.е. полученные результаты достоверны.

7. За ротацию севооборота содержание обменного фосфора и ортофосфатов на всех вариантах снизилось по всему профилю, однако это снижение по вариантам опыта весьма различно. Характер снижения одинаков – прогрессивный вниз по профилю. На варианте *К* это снижение составило от 23 мг/кг в пахотном слое до 13 мг/кг в слое 80–100 см, или 51,1 и 92,9%. На варианте орг. фона оно выше – 41 и 13 мг/кг соответственно, или 63,1 и 92,9%. На варианте 1NPK + орг. фон это снижение составило 37 и 13 мг/кг, или 51,4 и 92,9% соответственно, то есть потери фосфора на вариантах орг. фона и 1NPK + орг. фон близки. На варианте 2NPK + орг. фон потери фосфора в верхней части профиля существенно ниже – 17 мг/кг в пахотном слое, 22 мг/кг в слое 40–60 см и снижаются до 15 мг/кг, или на 22,4, 91,7 и 93,7% соответственно. На варианте *Д* + орг. фон снижение содержания этих форм фосфора составило в пахотном слое 20 мг/кг, а слое 80–100 см 12 мг/кг, или 36,4 и 100,0% соответственно. На варианте *Д* + 1NPK это снижение составило 30 и 13 мг/кг, или 47,6 и 100%.

8. Внесение удобрений и дефеката способствует повышению коэффициента изменения валового содержания (*Кр*) и степени подвижности (*КСПр*) фосфора. В наибольшей степени это проявляется на варианте 2NPK + орг. фон. Эффект от внесения дефеката сравним с внесением навоза или превышает его. Подобная закономерность наблюдается и по изменению величины показателя характера фосфатного режима (*Пр*). Применяемые в опыте системы удобрения и *Д* устойчиво повышают «потенциальную буферную способность» в отношении фосфатов – РВСП и поддерживают ее на более высоком уровне по сравнению с контролем.

9. Внесение органических, органоминеральных удобрений и дефеката повышает и стабилизирует урожай с.-х. культур. Максимальные прибавки урожая выявлены на варианте 2NPK + орг. фон: по ячменю – 1,27 т/га, по озимой пшенице – 2,03 т/га и по сахарной свекле – 11,6 т/га. Минимальные прибавки урожая отмечены на варианте *Д* + орг. фон по ячменю – 0,05 т/га и сахарной свекле – 3,8 т/га и на варианте орг. фона по озимой пшенице – 0,73 т/га.

10. Максимальная энергетическая эффективность установлена на варианте *ОСУ* – *R* = 3,56, незначительно ниже – на варианте *Д* + 1NPK – *R* = 3,38. На варианте *ОМСУ* + 2NPK отмечено снижение энергетической эффективности по озимой пшенице с 2,78 до 1,82, т.е. в 1,5 раза. Это снижение наблюдается на вариантах сахарной свеклы и ячменя. Максимальная энергетическая эффективность применения удобрений и дефеката установлена по озимой пшенице – *R* = 3,58, а минимальная по ячменю – *R* = 1,89.

РЕКОМЕНДАЦИИ ПРОИЗВОДСТВУ

Для снижения темпов агрогенного подкисления черноземов необходимо регулярное поддерживающее известкование один раз в ротацию севооборота (6 лет).

Для сокращения затрат на известкование и с учетом длительного последствия дефеката можно известковать один раз за две ротации севооборота.

Длительное последствие дефеката стабилизирует режим фосфатов в черноземе выщелоченном, поэтому следует использовать как последствие, так и поддерживающее известкование.

Перспективы дальнейшей разработки темы

Дальнейшая разработка темы диссертационного исследования планируется по следующим направлениям.

1. Исследование влияния агрогенного подкисления на трансформацию минеральной основы.
2. Исследование влияния трансформации минеральной основы на запасы и характер распределения по профилю минерального фосфора.
3. Исследования влияния трансформации органофилия на запасы и характер распределения по профилю органофосфатов.

Работы, в которых опубликованы основные результаты диссертации

Публикации в рецензируемых научных изданиях

1. Агрогенное подкисление черноземов в результате применения различных систем удобрения в ЦЧР / **Д.И. Бережнов**, В.Б. Пименов, К.Е. Стекольников, Е.С. Гасанова // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2021. – Т. 14, № 3(70). – С. 77–92.

2. **Бережнов, Д.И.** Влияние применения удобрений и мелиорантов на содержание различных форм фосфора в черноземе выщелоченном в условиях длительного стационарного опыта / **Д.И. Бережнов**, Е.С. Гасанова, К.Е. Стекольников // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2020. – Т. 13, № 4(67). – С. 183–197.

Статьи в сборниках и других научных изданиях

3. Пименов, В.Б. Влияние последствия дефеката и гидротермических условий на актуальную и обменную кислотность Чернозема выщелоченного / В.Б. Пименов, **Д.И. Бережнов**, К.Е. Стекольников // Агроэкологический вестник: матер. международной науч.-практ. конф. «Экологические проблемы с.-х. производства» (Воронеж, 27 декабря 2021 г.). – Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2021. – С. 133–145.

4. **Бережнов, Д.И.** Влияние последствия дефеката и гидротермических условий на гидролитическую кислотность чернозема выщелоченного / **Д.И. Бережнов**, В.Б. Пименов, К.Е. Стекольников // Агроэкологический вестник: матер. международной науч.-практ. конф. «Экологические проблемы с.-х. производства» (Воронеж, 27 декабря 2021 г.). – Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2021. – С. 163–173.

5. **Бережнов, Д.И.** Влияние систем удобрения и дефеката на содержание подвижного и обменного фосфора в черноземе выщелоченном / **Д.И. Бережнов**, К.Е. Стекольников // Биотехнологические приемы производства и переработки сельскохозяйственной продукции: матер. Всероссийской (национальной) науч.-практ. конф. (Курск, 8 февраля 2021 г.) – Курск: Изд-во Курской гос. с.-х. акад., 2021. – Ч. 1. – С. 238–242.

6. **Бережнов, Д.И.** Влияние удобрения и дефеката на содержание различных форм фосфора под озимой пшеницей / **Д.И. Бережнов**, Е.С. Гасанова, К.Е. Стекольников // Келлеровские чтения: матер. национальной (с международным участием) науч.-практ. конф., посвященной 145-летию со дня рождения академика, заслуженного деятеля науки РФ Б.А. Келлера и 130-летию со дня рождения проф. Б.М. Козо-Полянского, (Воронеж, 28–29 апреля 2020 г.). – Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2020. – С. 324–330.

7. **Бережнов, Д.И.** Влияние систем применения удобрения на содержание минерального и подвижного фосфора / **Д.И. Бережнов**, Е.С. Гасанова, К.Е. Стекольников // Агроэкологический вестник: матер. международной науч.-практ. конф. «Экологические проблемы с.-х. производства» (Воронеж, 22 декабря 2020 г.). – Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2020. – С. 52–60.

8. **Бережнов, Д.И.** Влияние систем применения удобрения на содержание и степень

подвижности фосфора / Д.И. Бережнов, Н.В. Стекольников, К.Е. Стекольников // Агро-экологический вестник: матер. международной науч.-практ. конф. «Экологические проблемы с.-х. производства» (Воронеж, 22 декабря 2020 г.). – Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2020. – С. 60–68.