

**Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Воронежский государственный аграрный университет
имени императора Петра I»**

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

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата сельскохозяйственных наук

Научный руководитель:
доктор сельскохозяйственных наук
Стекольников Константин Егорович

Воронеж
2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ	9
1.1 Фосфор в почвах	11
1.2 Соединения фосфора	15
2 ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ	26
2.1 Объекты исследования	26
2.2 Условия почвообразования	28
2.2.1 Климат места проведения исследования	28
2.2.2 Геология и материнские породы	33
2.2.3 Рельеф и гидрография	34
2.2.4 Растительность	35
2.3 Методы исследования	35
3 ВЛИЯНИЕ СИСТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ УДОБРЕНИЯ И ДЕФЕКТА НА ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЧЕРНОЗЕМА ВЫЩЕЛОЧЕННОГО	39
4 ВЛИЯНИЕ УДОБРЕНИЙ И ДЕФЕКТА НА СОДЕРЖАНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ФОРМ ФОСФОРА	74
4.1 Фосфор в почвах и его формы	74
4.2 Влияние удобрений и дефеката на экстрагируемость фосфатов	111
4.3 Влияние систем применения удобрения и дефеката на потенциальную буферную способность в отношении фосфатов	130
5 ВЛИЯНИЕ СИСТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ УДОБРЕНИЯ И ДЕФЕКТА НА УРОЖАЙНОСТЬ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР И ЭНЕРГЕТИЧЕСКУЮ ЭФФЕКТИВНОСТЬ	142
5.1 Энергетическая эффективность применения удобрений и дефеката	144
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	151
РЕКОМЕНДАЦИИ ПРОИЗВОДСТВУ	154
ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШЕЙ РАЗРАБОТКИ ТЕМЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ...	155
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	156

ВВЕДЕНИЕ

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 очень важным биогенным элементом, необходимым для питания растений. Он участвует в сложных метаболических процессах, таких как 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 и требуют проведения дополнительных исследований.

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. Научные работы этих ученых 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 повышенным 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 про-

грамму 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 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 периодических изданиях и докладывались на различных научно-практических конференциях:

- научно-практические конференции профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов Воронежского государственного аграрного университета имени императора Петра I (2019–2020 гг.);

- национальная (с международным участием) научно-практическая конференция, посвященная 145-летию со дня рождения академика, заслуженного деятеля науки РФ Б.А. Келлера и 130-летию со дня рождения профессора Б.М. Козо-Полянского, «Келлеровские чтения» (Воронеж, 28–29 апреля 2020 г.);

- Международная научно-практическая конференция, посвященная 80-летию заслуженного работника сельского хозяйства Российской Федерации, академика Международной академии аграрного образования, действительного члена Международной академии информатизации, заслуженного профессора Воронежского государственного аграрного университета, профессора Владимира Ефимовича Шевченко, «Актуальные проблемы селекции, семеноводства и сохранения плодородия почв» (Воронеж, 12 апреля 2021 г.);

- Всероссийская (национальная) научно-практическая конференция «Биотехнологические приемы производства и переработки сельскохозяйственной продукции» (Курск, 8 февраля 2021 г.).

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 ВГАУ.

Личный вклад соискателя. Автор принимал личное участие в планировании и проведении экспериментов, обобщении данных, опубликованных в российских и зарубежных литературных источниках, анализе и обработке результатов собственных исследований (полевые исследования, отбор и анализ почвенных образцов и др.), обработке и систематизации полученных результатов, подготовке научных публикаций и оформлении диссертационной работы (доля участия автора – 80 %).

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, в том числе 17 на иностранных языках.

1 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Фосфор (от греч. φῶς – свет и φέρω – несус; φωσφόρος – светоносный; лат. *Phosphorus*) – химический элемент 15-й группы третьего периода периодической системы Д.И Менделеева с атомным номером 15. Элемент входит в группу пниктогенов. Фосфор открыл алхимик из Гамбурга Хенниги Бранд в 1669 г. Как и многие другие алхимики он преследовал цель найти философский камень, но вместо него получил вещество, которое светится. Спустя некоторое время немецкий химик Иоганн Кункель смог получить фосфор. Независимо от Бранда и Кункеля фосфор был также получен Р. Бойлем, который описал этот элемент и процесс его получения в статье «Способ приготовления фосфора из человеческой мочи» (опубликована в 1693 г.). Но наиболее совершенный способ получения фосфора был опубликован спустя полвека, в 1743 г. А. Маргграфом [1, 38, 139]. При этом существуют данные, что фосфор получали еще в XII в. арабские алхимики.

По данным В.А. Ковды [79, 101], валовые запасы фосфора оцениваются в 10^{19} т, из них в земной коре содержится 10^{15} т. Наибольшее содержание наблюдается в горных породах земной коры, главным образом в базальтах, в донных отложениях мирового океана и в гумусовой оболочке планеты. В земной коре содержание фосфора находится в интервале 0,08–0,09% ее массы.

С геохимической точки зрения фосфор можно отнести к элементам-примесям, он входит в состав очень многих пород, однако некоторые все же могут состоять преимущественно из фосфорсодержащих минералов. В общей сложности в литосфере содержится около 206 фосфорсодержащих минералов. Преимущественно все они являются ортофосфатами, исключением является только один из них – фосфид (шрейберзит). К фосфорсодержащим минералам относятся преимущественно минералы из группы апатита [1, 33, 78, 99, 137].

Глобальный цикл фосфора существенно отличается от циклов других химических элементов. Это отличие заключается в гораздо меньшей степени замкнутости круговорота. Если рассматривать небольшие отрезки времени – десятилетия, столетия и даже тысячелетия, то может создаться впечатление полного отсутствия цикличности в перемещении фосфора. Эта цикличность проявляется

лишь в масштабах геологического времени – миллионов и десятков миллионов лет [78, 101].

Все химические элементы поступают в глобальные циклы различными путями: одни – из недр во внешние геосферы при их дегазации, другие – в геологический круговорот в результате процессов выветривания. Продукты выветривания могут быть в различных фазах: твердой, жидкой и газообразной. Жидкие продукты выветривания активно выщелачивают из гранитного слоя многие химические элементы, в том числе и такие жизненно важные элементы, как фосфор, кремний, кальций, калий и натрий. Для них атмосферный перенос играет подчиненную роль, а основная миграция происходит в системе суша – океаны. Все элементы весьма активно вступают в различные реакции, а также поглощаются многочисленными живыми организмами и включаются в трофическую цепь [1, 55, 78, 101, 160].

В Мировом океане содержится очень большое количество фосфора, но больше всего его содержится в глубинных слоях, куда не попадают солнечные лучи и где не может происходить его ассимиляция первичными продуцентами, то есть водорослями. Из-за этого глубоководные районы океана имеют слабую продуктивность. Высокую продуктивность имеет мелководная зона, районы апвеллинга, у которых на стыке холодных и теплых течений начинается подъем к поверхности глубинных вод, которые насыщены фосфором, кремнием, а также другими биофильными элементами [1, 78, 101]. При отмирании живых организмов они могут перемещаться в придонные слои и накапливаться в осадках. Именно в этих зонах накапливаются значительные запасы различных руд, в том числе и конкреционных фосфатов. Многие из них имеют промышленное значение, и только сложность их добычи затрудняет освоение этих руд. Но в связи с прогнозируемым истощением запасов фосфорного сырья на материках, следует предполагать, что в недалеком будущем будет налажена промышленная добыча из вод мирового океана. В океанах, после прохождения осадками стадий диагенеза, метаморфизма и выноса на поверхность, эти элементы вновь включаются в активную миграцию [78].

В поверхностных водах фосфор содержится главным образом в составе минеральных взвесей и комплексных анионов. При этом на долю минеральных взвесей приходится почти 90% от ежегодно выносимых реками в океаны 18–21 Мт фосфора. Следует отметить, что практически отсутствует обратный поток, способный компенсировать потерю фосфора сушей, поскольку он слабо включается в воздушную миграцию (небольшие количества фосфора переносятся из океанов на сушу питающимися рыбой морскими птицами) [1, 78, 101].

Фосфор находится в остром дефиците в морских экосистемах, поэтому он многократно захватывается живыми организмами и задерживается ими в слое воды до глубины проникновения солнечного света [78, 101].

1.1 Фосфор в почвах

Набор и количественное соотношение химических элементов в почве называют ее элементным составом. Любые почвы содержат все 92 элемента Периодической системы Д.И. Менделеева, а в случае химического загрязнения в почвах обнаруживаются и трансурановые элементы.

Химические элементы представлены в почвах большим набором их химических соединений. Разнообразие соединений любого из элементов обеспечивает сравнительную устойчивость химического состояния почв.

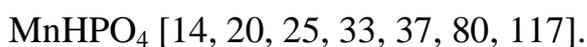
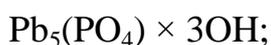
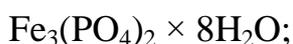
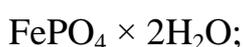
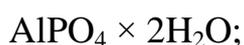
Кларк фосфора составляет 0,12% от массы земной коры. Как правило, содержание фосфора зависит от гранулометрического состава почвы. Глинистые породы им обогащены, а песчаные обеднены [1, 38]. Главные запасы соединений фосфора содержатся в земной коре, в осадках Мирового океана и в почвенном покрове. Базальты и в меньшей степени габбро, андезиты, сиениты являются главными источниками фосфора, поступающего при выветривании в биосферу. Он может поступать с космической пылью и метеоритами [78, 101].

Основным источником фосфора в почвах является ее минеральная фаза. В составе почвообразующих пород, представляющих собой верхнюю часть коры выветривания, известны около 200 минералов [85], в состав которых входит фосфор, однако наибольшие его количества встречаются в виде всего нескольких ис-

копаемых – апатита $\text{Ca}_{16}(\text{PO}_4)_6(\text{F}, \text{Cl}, \text{OH})_2\text{OH}$, фосфатов железа (FePO_4) и алюминия (AlPO_4).

По мнению А.Ю. Кудеяровой [85], в почвах чаще всего выявляются три группы (по 8–11 разновидностей): фосфаты кальция и магния, фосфаты полурооксидов и комплексные фосфаты. Так, в сероземах и черноземах преобладают фосфаты кальция. В кислых подзолистых и красноземных почвах чаще всего встречаются фосфаты алюминия, в заболоченных – фосфаты железа [88].

Самые распространенные соединения фосфора – ортофосфаты, в почве находятся как в виде соединений с кальцием, так и алюминием, цинком, свинцом, железом, марганцем. О разнообразии фосфатов можно судить по количеству их почвенных соединений, таких как:



Большая часть фосфора представлена органическими соединениями и конденсированными фосфатами. Фосфор, входящий в состав органического вещества становится доступным только после его разрушения микроорганизмами. Эти процессы составляют основу превращений фосфора в природе (рис. 1).

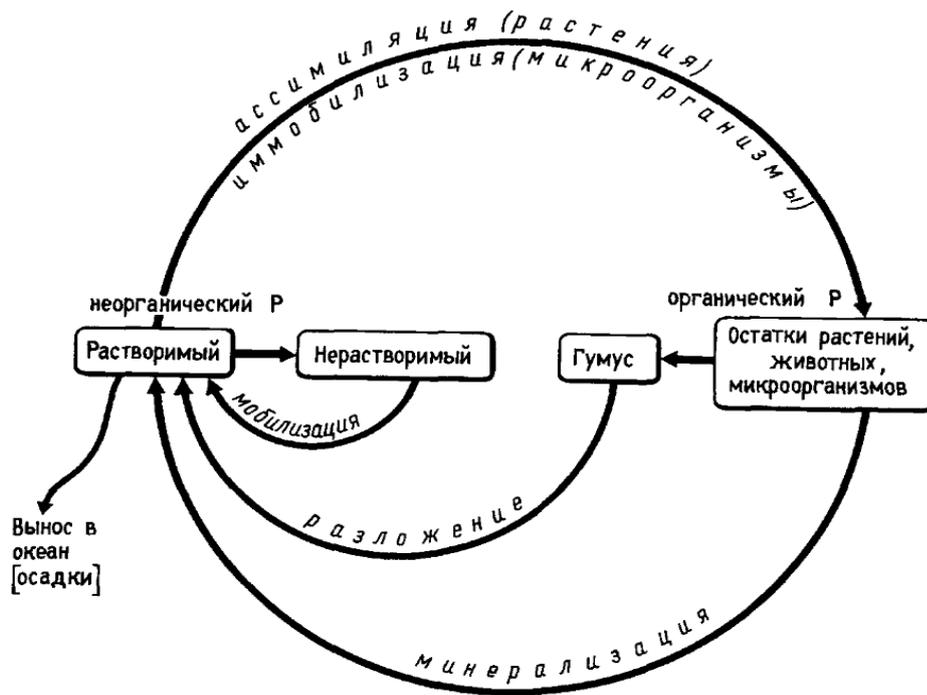


Рисунок 1 – Осадочный цикл фосфора в биосфере

Биогеохимия фосфора совершенно другая, нежели у углерода, серы, азота, кислорода. Эти газовые формы являются основной составляющей частью биогеохимии. Газовые формы соединений фосфора (PH_3) практически не представлены в биогеохимическом круговороте [78].

На рисунке 1 не показано влияние деятельности человека на осадочный цикл фосфора, наглядно это влияние представлено на рисунке 2.

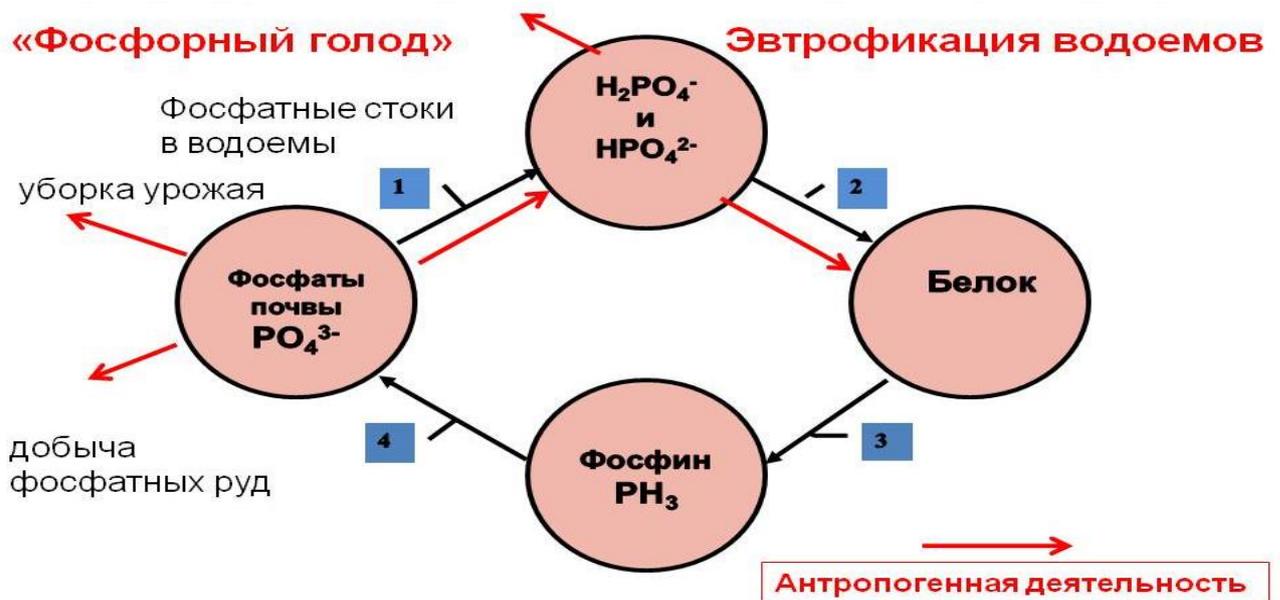


Рисунок 2 – Природно-антропогенный цикл фосфора в биосфере

Как следует из данных рисунка 2, деятельность человека оказывает существенное влияние на природный цикл фосфора. Природно-антропогенный цикл в значительной мере обусловлен особенностью потребления живыми организмами фосфора (Рисунок 3).

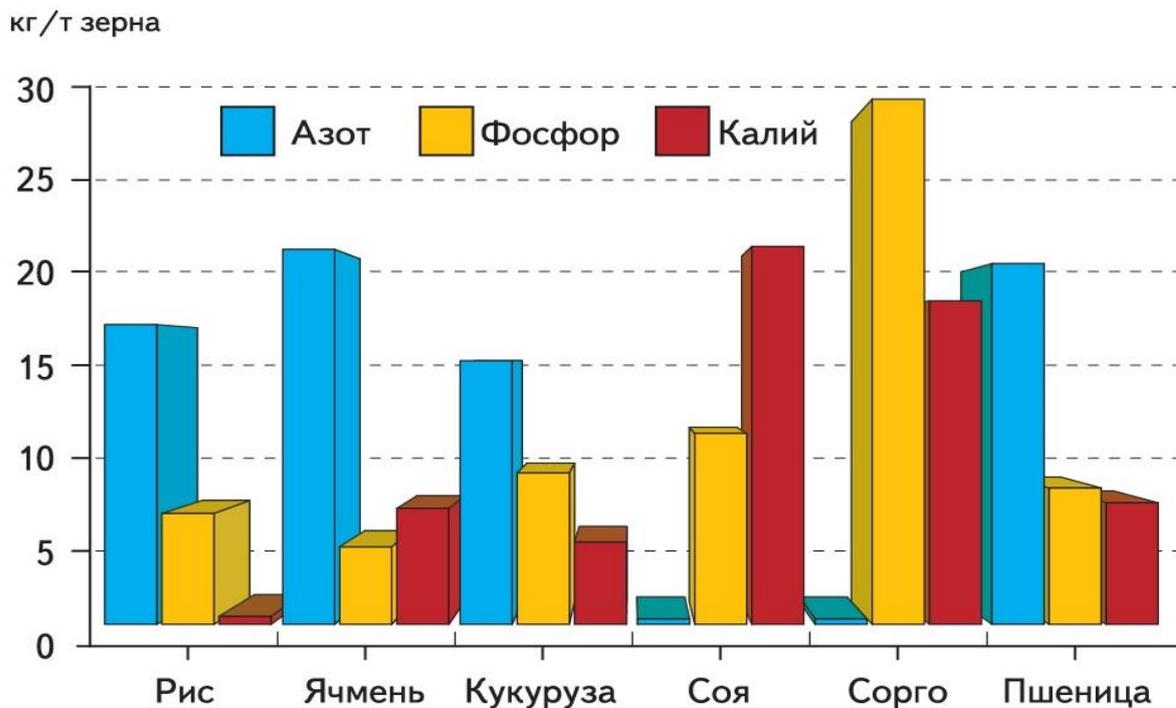


Рисунок 3 – Потребление питательных веществ различными сельскохозяйственными культурами

Следует отметить, что фосфор, являясь важнейшим макроэлементом, потребляется живыми организмами в меньшем количестве, чем азот и калий. Это наглядно представлено на рисунке 3. Только такая культура, как сорго потребляет фосфора больше азота и калия. Все важные продовольственные и, прежде всего, зерновые культуры, потребляют фосфора меньше, чем азота и калия.

Почвенный покров земного шара имеет хорошо выраженную зональность. Если посмотреть почвы с севера на юг к экватору, то главнейшие почвенные типы образуют следующий ряд: подзолы, дерново-подзолистые и серые лесные почвы, черноземы, каштановые, бурые пустынные почвы и сероземы, желтоземы и красноземы. В подзолистых и дерново-подзолистых почвах, а также желтоземах и особенно, красноземах, содержится очень много подвижных соединений железа и алюминия. Они весьма прочно фиксируют фосфор, образуя практически нерас-

творимые соединения. При внесении фосфорных удобрений в почву они относительно быстро изменяются в соответствии с физико-химическими и биологическими особенностями почвы, поэтому они по своей доступности приближаются к почвенным фосфатам [24, 114, 134, 167, 175, 185, 188, 187].

Доступность растениям вносимых с удобрениями фосфатов обусловлена их превращениями в почве. Экспериментально было установлено, что существуют 4 группы процессов, которые влияют на то, как трансформируются фосфаты в почве:

- геохимические – проявляются за счет роста разнообразия форм фосфатов содержащихся в почве, а также выноса/привноса фосфора из/в зоны почвообразования путем разрушения первичных фосфорсодержащих минералов;

- биологические (высшие растения и низшие организмы) – оцениваются через общее количество фосфора, усвояемого растениями и микроорганизмами, то есть через иммобилизацию фосфатов;

- химические (включая биохимию и физическую химию) – обусловлены главным образом внешними условиями (гидротермические, ОВП, pH, концентрационные), значительно влияющими на состав подвижных фосфатов;

- антропогенные (удобрения и мелиоранты) – максимально проявляются при внесении фосфорсодержащих удобрений, а также выносе фосфора из почвы с урожаем.

Антропогенные воздействия на почву напрямую связаны с процессом ретроградации вносимых фосфатов. Многие ученые [19, 107, 174, 176] считают, что ретроградация происходит сильнее, если почва слабо окультурена, то есть если в почве меньше подвижного фосфора.

1.2 Соединения фосфора

Фосфор играет важную роль в обмене веществ. Азотный и углеводный обмен у живых организмов протекает только при участии фосфора, находящегося в различных формах и играющих специфическую биохимическую роль. Энергетика растений и микробов тесно связана с биохимическими реакциями, протекающими при участии фосфора [118, 121, 161].

Основным путем поступления фосфора в почву и других компонентов биосферы является техногенный; например, в результате применения минеральных удобрений и средств защиты растений. Очень большое количество фосфорных соединений содержится в составе моющих средств, которые повседневно применяются в быту. В настоящее время широко используются синтетические моющие средства, которые могут содержать 10–12% пирофосфата калия, от 4–5% до 40–50% триполифосфата натрия, а также некоторые другие компоненты. Совместно со сточными водами вся эта масса, попадая в почву и водоемы, очень сильно их загрязняет [78, 118, 139, 181, 189].

Фосфорная кислота образует с кальцием три типа солей: однокальциевый фосфат – $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \times 2\text{H}_2\text{O}$, двухкальциевый фосфат – $\text{CaHPO}_4 \times 2\text{H}_2\text{O}$ и трехкальциевый фосфат – $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 \times 0.5\text{H}_2\text{O}$ [115, 119, 122]. Эти соединения резко отличаются между собой по растворимости. И если однокальциевый фосфат – это относительно растворимое соединение, то трехкальциевый фосфат практически нерастворим [90, 91, 124].

В специальных методах при химических исследованиях почв из числа полифосфорных кислот активно применяется пирофосфорная кислота $\text{H}_4\text{P}_2\text{O}_7$, а также ее соль – пирофосфат натрия $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$, который также используется для ускорения извлечения гумусовых кислот из почвы [109].

Важнейшую роль в почвенных процессах играют соли и эфиры ортофосфорной кислоты H_3PO_4 . Ортофосфорная кислота является сильной минеральной кислотой. При обычной для почв реакции среды в почвенных растворах преобладают монозамещенные фосфат-ионы H_2PO_4^- [90, 190].

Ортофосфорная кислота образует различной степени замещенности соли с катионами NH_4^+ , Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Fe^{3+} , Al^{3+} и др. Однозамещенные, например NaH_2PO_4 , двузамещенные Na_2HPO_4 , и трехзамещенные Na_3PO_4 ортофосфаты щелочных металлов и аммония хорошо растворимы в воде и в результате гидролиза создают щелочную реакцию раствора. Величина pH 1% раствора Na_2HPO_4 равна 8,9, а раствора Na_3PO_4 – около 12,0. Растворы NaH_2PO_4 имеют слабокислую реакцию [99, 118, 119, 169, 188].

Органический фосфор по степени подвижности [119] подразделяется на фракции:

1) легкогидролизуемый – растворимый в 2% HCl при кипячении (40–50% органического фосфора);

2) трудногидролизуемый – извлекается только при последовательной обработке почвы 80% H₂SO₄ на холоде и 50% H₂SO₄ при кипячении (20–30% органического фосфора);

3) негидролизуемый – нерастворимый при указанных выше обработках (от 15,5 до 33,0% органического фосфора).

Органические формы фосфора имеют довольно высокую подвижность в почве и может в форме глюкозофосфатов и глицерофосфатов передвигаться по почвенному профилю [120, 121].

Гуминовые кислоты поглощают фосфатные ионы. Это происходит в результате обмена фосфат-иона на фенолгидроксильные группы гуминовых кислот. По мнению К.Е. Гинзбург [37] и К.Ф. Гладковой [39], органическое вещество почв оказывает влияние на фосфатный режим почв. В составе гуминовых кислот содержится от 2–3 до 50–80% органического фосфора почвы. Содержание фосфора в гуминовых кислотах колеблется от 0,03–0,05 до 0,3–0,5%. Другое дело с глинистыми минералами. Пленка гуминовой кислоты, обволакивающая гидрат оксидов алюминия и глинистые минералы, уменьшает закрепление фосфорной кислоты в почве в виде фосфатов алюминия и железа [121]. Это подтверждалось исследованиями А.Ф. Тюлина и Т.Ф. Маломахова [153].

Минерализацией органического вещества называется процесс разложения органического вещества до диоксида углерода, воды и простых солей. Происходит с участием редуцентов. Характер минерализации органического вещества зависит от водно-воздушного и теплового режимов, агробиоценоза, физико-химических свойств почв [137]. Под действием различных ферментов, например фитазы, от органических фосфорсодержащих соединений отщепляются остатки ортофосфорной кислоты. В дальнейшем это будет зависеть от реакции почвенного раствора, а также от того, насколько почва обогащена полуторным оксидом и кальцием.

На долю органических соединений фосфора в почвах приходится от 10–20 до 70–80% всех запасов фосфора. В связи с этим органические соединения являются наиважнейшим резервом, который обеспечивает растения фосфором [21].

Основным источником соединений фосфора для почв служат почвообразующие породы, представляющие верхнюю часть коры выветривания. Небольшая часть может попадать в почву через осадки, космическую а также атмосферную пыль. В пахотных почвах основная часть фосфора вносится с органическими и минеральными удобрениями. Соединения фосфора в почвах подвергаются различным превращениям. Фосфор, связанный с органической частью почвы, непосредственно растениями используется незначительно. Он является потенциальным запасом, из которого фосфор высвобождается по мере минерализации органического вещества [120].

Повышение подвижности фосфорсодержащих веществ – это трансформация труднорастворимых соединений фосфора в более растворимые или переход их в почвенный раствор. Основной путь увеличения подвижности фосфора связан с превращением трикальцийфосфата в ди- или монокальцийфосфат:



Необходимым условием этой реакции является присутствие свободных кислот, образующихся, в частности, путем биохимической трансформации почвенных углеводов в органические кислоты.

Иммобилизацией называют переход питательных веществ почвы из доступного для растений состояния в недоступную форму [137]. Применительно к фосфору это переход неорганических его соединений в органические формы (фосфолипиды, нуклеиновые кислоты) микробных клеток; в результате иммобилизованный фосфор оказывается недоступным для других организмов.

Под фиксацией фосфора понимают процесс перехода растворимых фосфорсодержащих соединений в нерастворимые за счет образования прочных связей с минеральными и органическими компонентами почвы. Реакции протекают при характерных для почв значениях pH, при этом участвуют в процессе главным образом подвижные формы фосфорных соединений. Часть этих фосфатов пред-

ставлена в почвенном растворе частицами CaHPO_4 , $\text{CaH}_2\text{PO}_4^+$, $\text{FeH}_2\text{PO}_4^{2+}$ и др. [137]. Наиболее наглядно этот процесс и условия его протекания показаны на рисунке 4 [118].

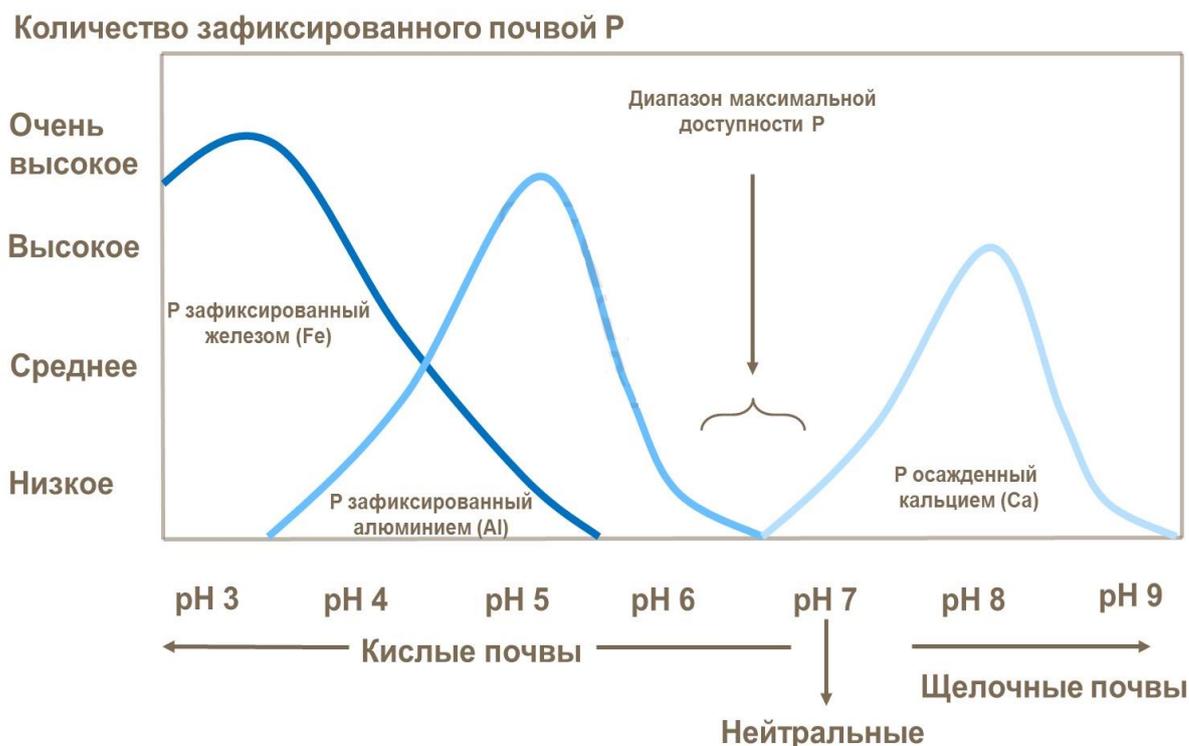


Рисунок 4 – Влияние кислотности на наличие в почве различных форм фосфора

Как следует из данных рисунка 4, этот процесс тесно связан с реакцией среды и наличия в почвенном растворе ионов Fe^{+3} , Fe^{+2} , Al^{+3} и Ca^{+2} . В области $\text{pH} = 3\text{--}4$ максимальная фиксация фосфора происходит с ионами железа, в области $\text{pH} = 4\text{--}6$ идет наиболее интенсивная фиксация фосфора ионами алюминия, а с ионами кальция фиксация фосфора протекает в щелочной среде при $\text{pH} = 7,5\text{--}8,5$. Поэтому в кислой среде образуются минералы типа штрэнгита ($\text{FePO}_4 \times 2\text{H}_2\text{O}$) и варисцита ($\text{AlPO}_4 \times 2\text{H}_2\text{O}$), а в щелочной – гидроксиапатита ($\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6 \times (\text{H}_2\text{O})_2$).

В составе неорганических соединений фосфор входит в структуру первичных минералов или содержится в почве в виде нерастворимых солей фосфорной кислоты с Ca, Mn, Fe и Al. В качестве фосфорных удобрений применяют фосфориты $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ и апатиты $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3 \times (\text{F}, \text{Cl}, \text{OH})$ [7, 13, 82, 88, 126, 180].

Мобилизация фосфора из первичных минералов или нерастворимых соединений протекает при помощи кислот – неорганических и органических. Сильные

неорганические кислоты образуют нитрификаторы (азотную) и тионовые бактерии (серную). Органические кислоты происходят при прохождении анаэробных брожений и аэробных окислений органических веществ грибами. Очень большое количество продуцируют лишайники. Микоризные грибы также снабжают растения фосфором, за счет своей способности, которая позволяет растворять фосфорсодержащие минералы при помощи выделения органических кислот, а также своей способности разрушать фосфорорганические соединения. Самая активная мобилизация фосфора из нерастворимых соединений происходит в ризосфере, эта огромная масса гетеротрофных бактерий, которые живут за счет корневых выделений, создают в процессе дыхания CO_2 , как и сами корни, и это помогает растворять соли фосфора [1, 7, 47, 54, 55, 68, 72, 78, 83, 93, 97, 98, 111, 115, 136].

Устойчивость фосфорных соединений к микробному разложению зависит от природы катионов, с которыми связан фосфатный ион. Легче мобилизуется фосфат кальция, фосфат алюминия гораздо хуже растворим, фосфат железа устойчив к воздействию метаболитов. Влияние микроорганизмов на растворимость фосфатов весьма различно. Часть фосфатных ионов усваивается растениями в течение жизнедеятельности, часть иммобилизуется микроорганизмами, часть остается в почве. Вынос фосфора в моря и океаны – это односторонний процесс, потому что фосфор переходит в осадки и лишь в малой степени возвращается в круговорот по пищевым цепям морских животных и далее на сушу выносятся птицами в виде гуано.

Таким образом, общий поток превращений фосфора представляет собой осадочный биогеохимический цикл с образованием в океане «недоступных хранилищ». Перевод нерастворимых фосфатов в доступную для растений форму является главным фактором вовлечения фосфора в биологический цикл. При этом следует иметь в виду, что открытый океан мало продуктивен из-за отсутствия фосфора и железа в воде.

Деятельность человека становится все более мощным фактором, воздействующим на почву. Различные агротехнические и агрохимические обработки почв, рекультивация земель, загрязнение почв в результате промышленного про-

изводства происходит как прямо, так и через атмосферу и грунтовые воды. Все это оказывает такое сильное влияние на почву, особенно на жидкую фазу, что существенно перекрывает влияние природных факторов.

Минеральные удобрения, являясь мощнейшим фактором повышения продуктивности пашни, резко увеличивают концентрацию ионов в жидкой фазе почв [95, 96, 110, 149]. В результате взаимодействия с почвенным поглощающим комплексом происходят значительные изменения в содержании и в соотношении всех компонентов почвенных растворов. В лабораторных опытах В.В. Снакина [136] показано, что внесение калийных удобрений повысило активность калия непропорционально добавленному количеству и составляет 2–20% от соответствующего увеличения активности нитратов. Подобные результаты были получены в опытах с бурой почвой на Ротамстедской опытной станции (Англия, 1973), в которых с помощью ионоселективных электродов и химическими методами в жидкой фазе почв обнаружили лишь 7–8% добавленного калия и 87–95% нитратов.

Повышение активности двухвалентных катионов в почвенном растворе в результате обмена с ППК приводит к их вымыванию в нижележащие горизонты, результатом чего является ухудшение свойств почв и, как следствие, плодородия. При внесении удобрений снижается содержание обменного кальция и магния. Учитывая это, на кислых почвах необходимо вносить кальциевую селитру или цианомид кальция, что в свое время рекомендовал В.А. Ковда [78] и другие исследователи.

За счет высокой реакционной способности фосфор в свободном состоянии в природе не встречается. В почвах он всегда содержится в пятивалентном виде, т.е. соответствует ангидриду P_2O_5 , который с водой и другими элементами образует обширную группу кислородных соединений фосфора – фосфорных кислот и фосфатов. В зависимости от числа молекул воды и числа замещенных молекул водорода, а также от количества тетраэдров PO_4^{3-} и способа их соединения между собой фосфаты образуют химические соединения, отличающиеся по растворимости в воде и различных растворителях, содержанию фосфора, физическим, физико-химическим свойствам.

Ортофосфаты (мономеры) – построены из изолированных тетраэдров PO_4^{3-} , в вершинах которых расположены атомы кислорода.

Конденсированные фосфаты (ортофосфаты – полимеры) получают путем частичного отщепления воды («конденсации») ортофосфатов; содержат меньше конституционной воды, но больше фосфора, чем мономерные ортофосфаты; состоят также из тетраэдров PO_4^{3-} , которые через общие кислородные вершины образуют фосфатные комплексы. В зависимости от способа соединения отдельных тетраэдров между собой конденсированные фосфаты образуют различные полимерные соединения [34, 38, 125].

Почти все соединения почвенных фосфатов (минеральные и органические формы) являются ортофосфатами (мономерами или полимерами), но могут встречаться и полимерные конденсированные фосфаты. Фосфор в почвах представлен органическими и минеральными соединениями.

В зависимости от генетического типа почв состав минеральных фосфатов в них различен. В карбонатных почвах предполагают преимущественно содержание различных форм фосфатов кальция, в слабокислых почвах – фосфатов кальция и полутораоксидов, в кислых почвах – фосфатов полутораоксидов. Экспериментально было выделено почти 200 минеральных вида фосфора и показано, что в основном их устойчивость зависит от различных почвенных условий, главным образом от pH. Поэтому одна и та же форма фосфорного соединения в различных почвенных условиях может быть проявлять свою ценность по-разному с точки зрения питания растений [6, 42, 114, 149].

В настоящее время для определения минеральных соединений фосфора применяются методы Чирикова [167, 166], Чанга-Джексона [180], Гинзбург-Лебедевой [36].

Опубликованы результаты большого количества исследований, посвященных различным формам фосфора в почвах. На стационаре кафедры агрохимии и почвоведения Воронежского государственного аграрного университета Ашрамом Мазеном Джумахом [18] выполнены исследования по выявлению особенностей формирования азотного, фосфорного и калийного режимов при сельскохозяй-

ственном использовании черноземов. Показано, что среди групп минеральных соединений фосфора наиболее подвижной легкоусвояемой растениями является группа его водорастворимых соединений.

Также установлено, что органические фосфаты почвы образуются от разложения растений, животных, а также микроорганизмов. Они являются одним из потенциальных источников питания растений фосфором. Представлены органические фосфаты двумя различными по природе группами соединений: продуктами биологического синтеза (соединения индивидуальной природы, неспецифические органофосфаты) и продуктами гумусообразования (специфические соединения).

Фосфорные эфиры индивидуальной природы, обнаруженные в почвах, относятся к трем основным классам соединений: фосфолипидам (до 1% от общего органического фосфора), нуклеиновым кислотам (8–9%) и различным изомерным формам инозитфосфатов (30–60%). Имеются сведения о наличии фосфопротеинов и сахарофосфатов, но практически, как замечает К.Е. Гинзбург [38], они не были выделены из почв. Более половины фосфорорганических соединений почвы составляют новообразованные специфические фосфогумусовые соединения [18].

Органические фосфорсодержащие соединения в почве входят в состав гумуса, навоза, растительных и животных остатков. Фосфор содержится в них, в противоположность азоту и сере, в окисленной форме, в виде остатка фосфорной кислоты. Больше всего фосфорорганических соединений относительно общих запасов фосфора в почве находится в черноземе (до 80%), меньше всего – в сероземе (не более 10%).

О степени подвижности фосфатов в почвах можно судить по умению твердых фаз почвы передавать в почвенный раствор ионы фосфора. Мерой этой способности является установление концентрации фосфора в почвенном растворе. Выделение почвенного раствора очень сложно, поэтому используют водные и слабосолевые вытяжки (0,01 М CaCl_2 , 0,03 н K_2SO_4) при узком соотношении почвы к раствору. Этот способ дает возможность получить растворы, близкие к концентрации фосфора в почвенном растворе.

В исследованиях Р.Е. Елешева с соавторами [59] были выявлены основные закономерности подвижности соединений фосфора в почвах, предложено использовать такой термин, как «интенсивность», а также способы ее выражения. Содержание фосфора в кислотных, щелочных и буферных вытяжках характеризует фактор «емкости».

Обеспеченность растений фосфором определяется фактором буферности, характеризующим способность почвы поддерживать концентрацию фосфора на определенном уровне, т.е. способность почвы противостоять изменению ее фосфатного потенциала. По Бекетту и Уайт [36], эта способность называется «потенциальной буферной способностью» в отношении фосфатов – PBC^P , численно она равна:

$$PBC^P = Q/I, \quad (2)$$

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

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

Отношение Q/I показывает, какое количество подвижных фосфатов должно перейти из их общего запаса в почвенный раствор, или должно быть внесено в почву для изменения активности H_2PO_4 на одну единицу [61].

Фосфорные удобрения, внесенные в почву, претерпевают существенную трансформацию в результате процессов сорбции. Они имеют сложный характер и требуют дальнейшего изучения. О поведении фосфатов в почве дает представление классификация сорбционных процессов, предложенная в работе Е.Н. Гапона [32].



Рисунок 5 – Классификация сорбционных процессов [32]

К настоящему времени наиболее известны следующие виды и механизмы сорбции фосфатов почвами (цитируется по Ганжара Н.Ф., 2001):

- обменная сорбция фосфат-ионов на положительно заряженных коллоидах или участках коллоидной мицеллы;
- хемосорбция фосфат-ионов гидроксидами железа и алюминия на внешней поверхности коллоида;
- необменное поглощение фосфат-ионов на внешней и внутренней поверхности глинистых минералов, которое значительно возрастает с увеличением степени дисперсности минерала;
- образование слаборастворимых фосфатов (хемосорбция) при взаимодействии с солями почвенного раствора (фосфаты кальция, фосфаты железа);
- поглощение фосфат-ионов путем механического захвата – окклюдирования аморфным кремнеземом;
- образование фосфатов кальция при взаимодействии с гуматами кальция.

Одним из самых эффективных приемов, оказывающим существенное влияние на фосфатный режим в почве, является известкование. В кислой среде увеличивается содержание соединений фосфора, алюминия, железа, поэтому возрастает группа фосфатов, которая характеризует емкость (P_2O_5 в вытяжке $CaCl_2$), снижается группа, характеризующая фактор емкости почвы в отношении фосфора, уменьшается количество фосфора, доступного растениям [15, 29, 56, 73, 112, 113, 130, 147, 171].

2 ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

2.1 Объекты исследований

Диссертационное исследование проводили на территории УНТЦ «Агротехнология» Воронежского государственного аграрного университета (север Воронежской области). Объектом исследования являлся чернозем выщелоченный.

П.Г. Акуловым с соавторами [10] установлено, что в почвенном покрове ЦЧР черноземы выщелоченные являются преобладающим подтипом, занимая площадь 4416,4 тыс. га, или 29,9%. Лесостепь Воронежской области обусловлена значительным присутствием западин. Площадь и глубина вреза западин варьируют в очень широких пределах: от нескольких квадратных метров при глубине несколько десятков сантиметров до сотен квадратных метров при глубине более метра [16].

Большая часть западин с травянистым растительным покровом используется как пашня. Нераспаханными остались только западины с древесно-кустарниковой растительностью. Западины, которые были распаханы, из-за поверхностного переувлажнения сильно затруднили обработку этих земель. Из-за переувлажнения эти поля подходили намного позже остальных, что существенно затрудняло проведение каких-либо видов работ на данных участках. Поэтому часто они оставались пустыми, либо обрабатывались в последнюю очередь. Все это не могло пройти бесследно, и эти участки стали зарастать сорняками. Как правило, периферийные части западин представлены почвами разной степени гидроморфизма: от лугово-черноземных до влажно-луговых почв [16].

Для ЦЧР свойственна широтная зональность почвы. Это выражается в систематической смене подзон: черноземов оподзоленных и выщелоченных, типичных, обыкновенных и южных в направлении от северо-северо-западных к юго-юго-восточным границам региона [143].

Среднерусская возвышенность помимо сложного покрова почвы, характеризуется сильной расчлененностью территории, которая обусловлена эродированностью почв.

Междуречье Дона и Воронежа имеет сильную расчлененность и дренированность. Все это в свое время повлияло на формирование основного компонента почвенного покрова, западных почв. Преобладающий тип почвы – это черноземы типичные и выщелоченные тяжелого гранулометрического состава. На склонах отмечены почвенные разности из-за произошедшего смыва во время обильных осадков. На участках, разделенных водой, преобладают другие типы почв. В основном это черноземы выщелоченные, реже лугово-черноземные.

Исследования почв и их подробная характеристика, на которых заложен стационарный опыт, были выполнены М.С. Цыгановым и В.Ф. Куклиновой [163].

Полевые и лабораторные опыты, анализы и наблюдения проводили по принятым методикам с применением общепринятых методов в агрохимии и почвоведении.

Изучение влияния различных систем удобрения и дефеката на физико-химические свойства и режим фосфора чернозема выщелоченного проводилось в условиях длительного стационарного опыта, заложенного в Воронежском государственном аграрном университете в 1987 г. Опыт включает 15 вариантов. Размещение делянок двухрядное.

В диссертационном исследовании использовали следующие варианты:

- 1) контроль без удобрений;
- 2) фон – навоз 40 т/га за ротацию или 8 т/га ежегодно;
- 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;
- 15) дефекат + $N_{60}P_{60}K_{60}$.

Опыт заложен в четырехкратной повторности.

Схема опыта: пар черный, озимая пшеница, сахарная свекла, вико-овсяная смесь, озимая пшеница, ячмень. Культуры севооборота возделывались по технологии, соответствующей требованиям для Воронежской области.

Минеральные удобрения вносили ежегодно. Использовали такие удобрения, как аммиачная селитра, двойной суперфосфат, хлористый калий.

Навоз вносили под сахарную свеклу в дозировке 40 т/га один раз за ротацию.

Дефекат вносили трижды: первое внесение – под озимую пшеницу, по черному пару в 1987 г., второе – в дозе 20 т/га в 1999 г. (начало третьей ротации севооборота) на 13 и 15 вариантах, третье – в 2005 г. (начало четвертой ротации севооборота) в дозе 22 т/га дефеката на 13 и 15 вариантах [142, 143, 144].

Отбор образцов осуществлялся послойно, с шагом в 20 см. Глубина отбора проб – 1,0 м.

2.2 Условия почвообразования

Основоположник науки о почвах В.В. Докучаев выделил почвы в особое тело природы, сформировавшееся под воздействием факторов, названных им факторами почвообразования. Почвы и почвенный покров в целом являются результатом совокупного взаимодействия факторов почвообразования. Главный оппонент В.В. Докучаева П.А. Костычев был не согласен с ним, прежде всего, в отношении роли отдельных факторов почвообразования, отдавая предпочтение климатическому фактору при отрицании роли и значения остальных.

2.2.1 Климат места проведения исследования

Объект исследования расположен в Центральной природной сельскохозяйственной зоне [2]. Данные о метеорологических условиях за все годы проведения исследования были предоставлены Воронежской метеостанцией.

Чернозем выщелоченный, исследуемый в опытах, находится первом агроклиматическом районе. Тип климата – умеренно континентальный, средняя температурами января составляет -10 °С, июля – $+20$ °С, среднегодовая – $+4.5$ °С. Сумма активных температур – $2400-2600$ °С, в среднем количество дней, обладающих такой температурой, – $140-152$, гидротермический коэффициент – $0,9-1,10$. Режим осадков – типичный для лесостепной зоны. Среднегодовое количество осадков – $550-600$ мм. Распределение осадков по сезонам неравномерное. Большая часть осадков приходится на теплый период [2].

Данные по гидротермическим условиям периода наблюдений представлены в таблице 1 и рисунках 6, 7.

Учитывали данные за период активной вегетации сельскохозяйственных культур, возделываемых в опыте, т.е. с температурой выше +10 °С.

Таблица 1 – Гидротермические условия проведения исследования

Год	$\sum t > 10\text{ }^{\circ}\text{C}$						\sum осадков						ГТК					
	АВП	V	VI	VII	VIII	IX	АВП	V	VI	VII	VIII	IX	АВП	V	VI	VII	VIII	IX
2015	2922	505	621	654	614	528	190	22	72	50	30	16	0,65	0,44	1,16	0,76	0,49	0,36
2016	2843	472	588	701	679	403	255	75	45	38	64	33	0,90	1,59	0,76	0,54	0,94	0,82
2017	2720	434	516	632	670	468	243	26	62	62	46	47	0,89	0,60	1,20	0,98	0,69	1,00
2018	3025	564	570	682	663	546	229	51	35	79	19	45	0,76	0,90	0,61	1,16	0,29	0,35
2019	2838	530	666	595	601	446	242	91	12	100	25	14	0,85	1,72	0,18	1,67	0,42	0,31
2020	2880	415	639	679	623	524	178	75	65	29	7	2	0,62	1,81	1,02	0,43	0,11	0,04

Гидротермические условия периода проведения исследования характеризуются значительной неравномерностью. За период с мая по сентябрь месяцы выпало 178–255 мм осадков (Таблица 1).

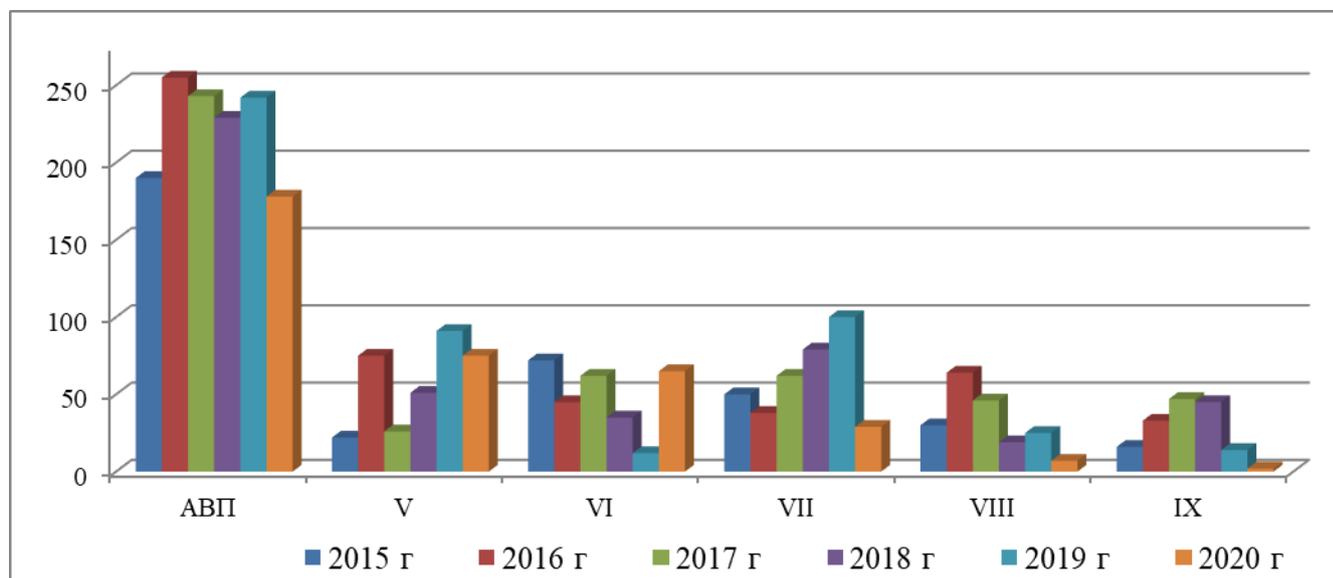


Рисунок 6 – Осадки активного вегетационного периода (АВП) за май – сентябрь

Если рассматривать начало активного вегетационного периода, то самым засушливым был май 2015 г. – 22 мм. Минимальное количество осадков в июне выпало 2019 г. – 12 мм. В июле 2020 г. выпало всего 29 мм осадков. Еще больший дефицит осадков в этом году наблюдался в августе – 7 мм и сентябре – 2 мм.

Данные гидротермического режима (ГТК) изучаемого периода представлены на рисунке 7.

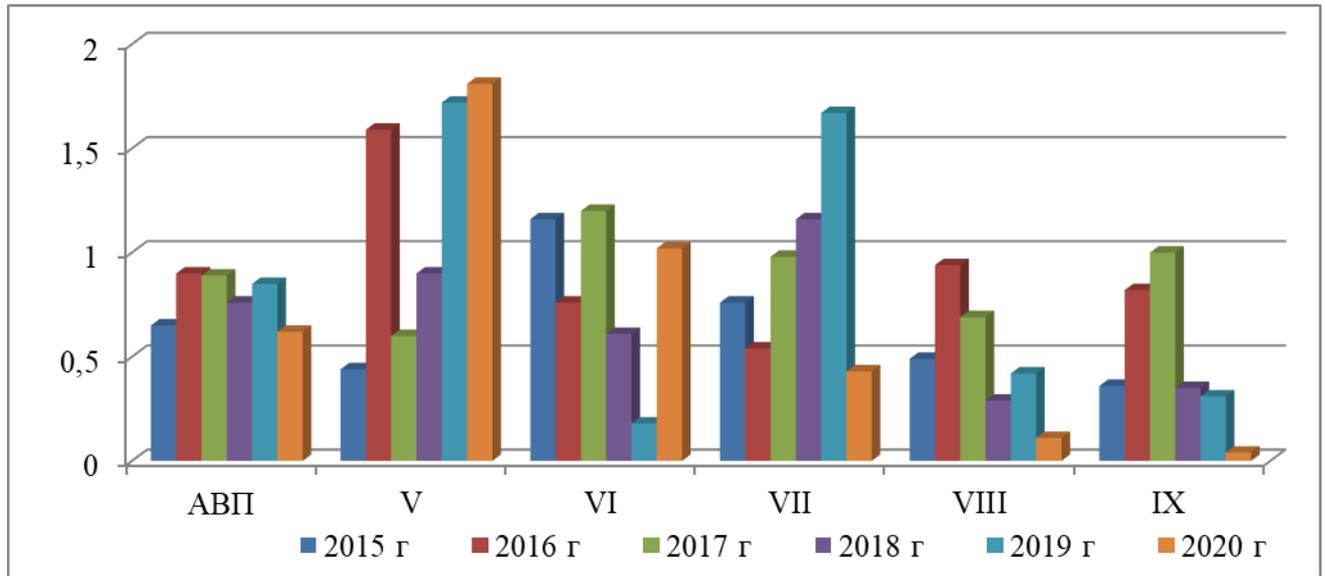


Рисунок 7 – Гидротермический режим (ГТК) активного вегетационного периода

Годы проведения исследования существенно различаются по теплообеспеченности активного вегетационного периода. Сумма активных температур варьирует в пределах 2720–3025 °С. Минимальная сумма активных температур наблюдалась в 2015 г., а максимальная – в 2018 г. Так, величина ГТК за исследуемый период варьировала в пределах 0,62–0,90, т.е. все годы характеризовались дефицитным увлажнением. Величина ГТК существенно варьировала и по периодам активной вегетации (Таблица 1, Рисунок 7). Минимальный ГТК отмечен в 2020 г., когда после избыточно увлажненного мая (ГТК 1,81) он снизился до 0,11 и 0,04 в августе и сентябре. Для зерновых культур благоприятными оказались гидротермические условия весны и лета, что обусловило их достаточно высокую урожайность, но отсутствие осадков в июле и сентябре не позволило сформировать высокие урожаи технических культур.

Климат является ведущим фактором почвообразования. Однако общепринятый анализ данных климата по режиму осадков и температуры мало информативен, поэтому мы при анализе климата отдали предпочтение методике Г. Вальтера [23], который предложил методику, основанную на составлении и анализе климатодиаграмм.

Адекватное представление о климате можно составить, хорошо зная сезонный ход погоды, для чего необходимо определить длительность влажного и засушливого периодов и их интенсивность. Используемые для этих целей климатограммы не позволяют сделать это, так как выделить на них засушливые и влажные периоды вегетации невозможно. Объективное решение поставленной задачи возможно лишь при использовании климадиаграмм, на которых хорошо выделяются сезонные изменения климатических условий. При построении климадиаграмм соотношение между средней месячной температурой и осадками принимают равным 1 : 2, то есть 10 градусам соответствует 20 мм осадков. При таком масштабе засушливая часть года характеризуется кривой осадков, расположенной ниже температурной кривой. Сравнение этих кривых полезно, потому что позволяет по температурной кривой судить о годовом ходе испарения, тем более что не каждая метеостанция располагает оборудованием, необходимым для проведения наблюдений за испарением. Эта же кривая отражает расход влаги, а кривая осадков – ее приход. Таким образом, обе кривые позволяют определить водный баланс территории.

Между засушливым и влажным сезонами не всегда можно выявить границу. Для выявления полусухого сезона соотношение температуры к осадкам принимают равным 1 : 3, что соответствует степной области (по Г.Т. Селянинову). Кривая осадков при этом дается прерывистой линией и располагается ниже, чем при соотношении 1 : 2. Площадь, заключенная между этой кривой и расположенной над ней кривой температуры, позволяет определить продолжительность (по горизонтали) полусухого сезона и его интенсивность (по вертикали). При выпадении в отдельные месяцы более 100 мм осадков, масштаб выше этого уровня уменьшают в 10 раз, а соответствующую область закрашивают синим цветом. Эти участки климадиаграммы, закрашенные синим цветом, соответствуют переувлажненным периодам. При таком избыточном увлажнении возможно формирование поверхностного стока.

Главной особенностью климата является хорошо выраженная периодичность влажных и засушливых периодов на климадиаграммах (Рисунок 8).

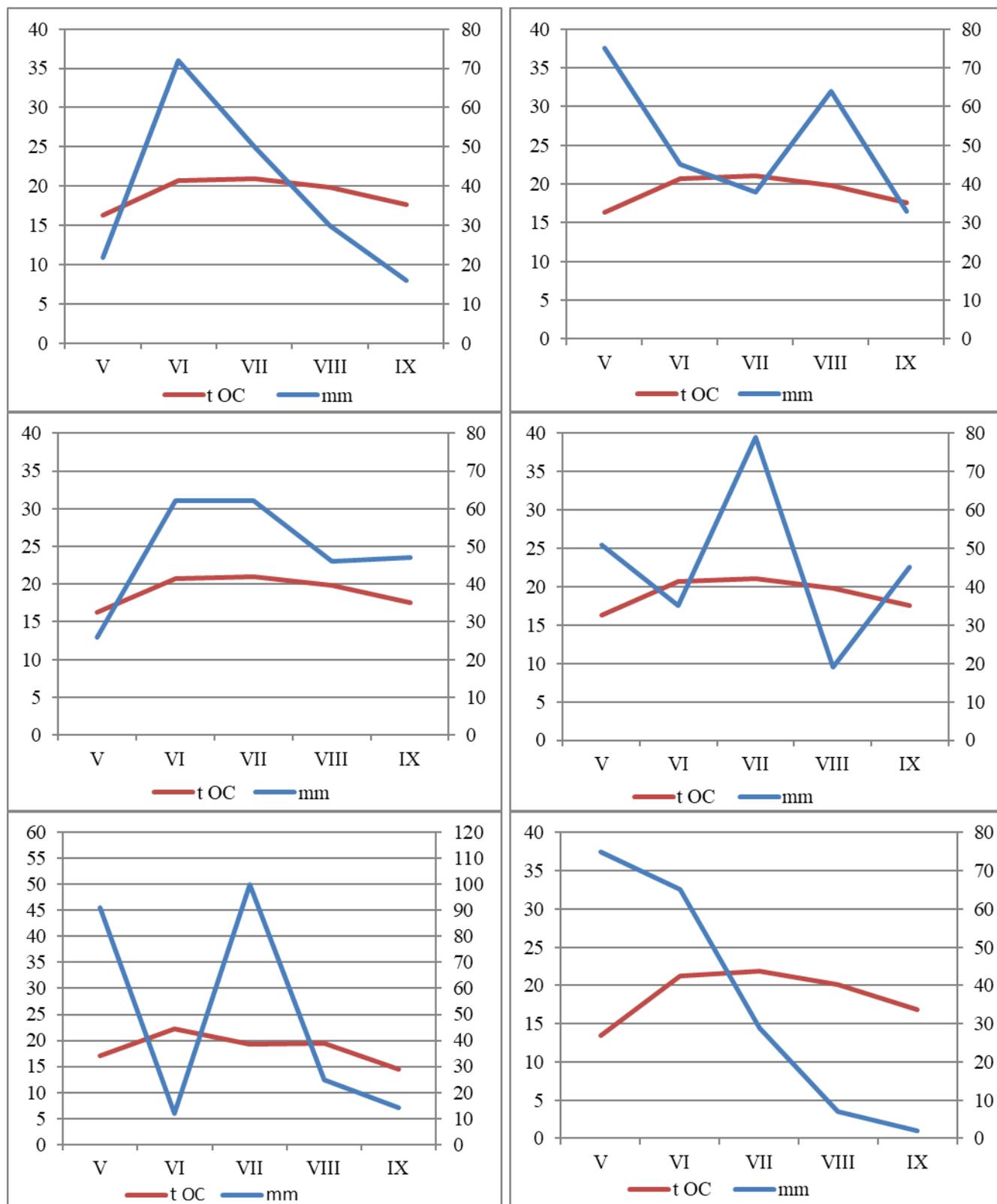


Рисунок 8 – Климатодиаграммы за 2015–2020 годы

Изучение климатодиаграмм показывает, что за период проведения исследований отсутствуют вегетационные периоды с нормальным увлажнением. При всем кардинальном различии метеоусловий вегетационных периодов есть характерная

особенность. Она заключается в смене излишне влажных периодов с засушливыми. В 2015 г. начало вегетационного периода было весьма засушливым. Июнь и июль, наоборот, были сильно увлажненными, а август и сентябрь – засушливыми. В 2016 г. были избыточно увлажненными только начало и конец вегетационного периода, а две декады июля – засушливыми. Сельскохозяйственный сезон 2017 г. начинался с кратковременной засухи, которая сменилась обильными осадками. Самые сильные осадки выпадали в таких месяцах, как июнь и июль. В 2018 и 2019 гг. отмечена резкая смена засушливых периодов июня и августа избыточным увлажнением в июле. Активный вегетационный период 2020 г. был избыточно увлажненным до первой декады июля, сменился нарастающей засухой.

Проанализировав климадиаграммы, мы отметили закономерность чередования засушливых и влажных сезонов. Это все способствовало образованию пульсирующего водного режима на изучаемых почвах. В отдельные годы миграционные формы карбонатов поднимались до границы гумусового горизонта.

2.2.2 Геология и материнские породы

Если климат определяется главным образом космическими факторами, то вторым по значимости материальным фактором почвообразования являются почвообразующие породы (материнские) [135]. Такой тип конструкции присущ той части, на которой располагается экспериментальное поле, которое описывается по геологическому разрезу. Подобное строение характерно для той части водораздела, на которой размещается опытное поле.

Территория УНТЦ «Агротехнология» Воронежского ГАУ приурочена к Дон-Воронежскому водоразделу, который имеет сложное геологическое строение. Характерной особенностью геологического строения этой территории является примыкание аллювиальных песчаных отложений долины р. Дон к цоколю водораздела, сложенного тяжелыми отложениями. Поймы рек Дон и Воронеж и их надпойменные террасы сложены современными аллювиальными отложениями песчаного гранулометрического состава. Водораздел с поверхности сложен 5–8 м толщей суглинков проблематичного генезиса, которые подстилаются мощной

толщей флювиогляциальных песков, которые местами выходят на дневную поверхность, создавая этим существенную пестроту почвообразующих пород. Правобережье р. Дон и Воронеж, по данным А.А. Дубянского с сотрудниками [50, 51], сложены мощной толщей суглинков.

Наличие разных по гранулометрическому составу почвообразующих пород обуславливает пестроту почвенного покрова. На тяжелых по гранулометрическому составу почвообразующих породах формируются темно-серые лесные почвы и чернозем выщелоченный, на легких – серые и светло-серые лесные почвы.

2.2.3 Рельеф и гидрография

Являясь важнейшим фактором почвообразования, рельеф не оказывает прямого влияния на почвообразование как климат и почвообразующие породы. Его роль сводится к перераспределению по элементам рельефа солнечной энергии и атмосферных осадков. По данным Г.И. Раскатова [132], эрозионно-аккумулятивный рельеф Окско-Донской низменности сформировался в верхнечетвертичную эпоху, для которой характерны многократные поднятия [143].

Опыт заложен неподалеку от водораздельно-западинного недренированного междуречья, что подтверждается исследованиями Ф.Н. Милькова [104, 105] и И.Н. Ежова [57, 58]. Согласно стадийности эрозионного развития по К.А. Дроздову [48], изучаемая территория относится к третьему типу – овражным районам со слабым развитием долинно-балочной сети.

УНТЦ «Агротехнология» находится на разделе рек Дон и Воронеж [143]. Выглядит он в виде плоской, относительно узкой территории, в некоторых местах шириной до 3–5 км. Главенствующий массив расположен на склоне ($1-3^\circ$), отделенном водой. Он достаточно изрезан балками, ложбинами. Залегание грунтовых вод – достаточно глубокое. Все это указывает на хорошую дренированность. Грунтовые воды пресные, так как их минерализация не превышает 0,3–0,5 г/л. С 1972 г., после создания Воронежского водохранилища, качество грунтовых вод стало прогрессивно ухудшаться. В составе солей в основном содержатся соли кальция и магния [49].

2.2.4 Растительность

Растительность является одним из ведущих факторов, активно влияющих на почвообразование. Растительность тесно связана с климатом, почвообразующими породами и рельефом. Именно этими факторами определяется тип растительности и ее развитие. Хозяйственная деятельность человека оказывает существенное влияние на естественную растительность. По ботанико-географическому районированию исследуемая территория относится к лесостепи и переходной зоне от лесостепи к степи. Сформировать текущий почвенный покров помогла степная растительность, а также лесная [143]. В связи с высокой сельскохозяйственной нагрузкой на земли природная растительность могла произрастать лишь в поймах рек, оврагах, балках. На территории УНТЦ «Агротехнология» имеется множество западин. До окультуривания на них произрастала естественная растительность. Древесная растительность была представлена ивой, осиной, березой. Луговая растительность представлена в основном гидрофитами. Из-за того, что снижался уровень грунтовых вод, в западинах стал произрастать дуб. По окраинам западин стали формироваться кустарники, их наиболее частым представителем являлся тёрн. Основная часть этих луговых западин сейчас распахана. Склоны балок заняты древесной растительностью, представителями которой в основном являются липа, осина, дуб, береза.

Явные представители степной растительности – это ксерофитные виды, полынные ассоциации и разнотравье.

Нетронутые участки используются для выпаса скота. На них господствующими являются марь белая, мятлик луговой, полынь горькая [64, 163].

2.3 Методы исследования

Чтобы наиболее эффективно исследовать режим фосфора, необходимо применять метод, который помогает определить калий. На сегодняшний день существует более 100 методов извлечения фосфора и еще больше методов по экстракции калия [3, 13, 31, 36, 92, 103, 106, 109, 129, 151, 158, 166, 191, 184, 180, 186]. Такое обилие методов определения подвижных форм фосфора говорит о том, что

еще не найдено реактива (экстрагента), действие которого на почву было бы устойчиво и сопоставимо способности корневой системы усваивать элементы питания [38, 40, 71, 72, 96, 114, 122, 123]. В свое время Д.Н. Прянишников [131] писал: «... нужно удивляться не тому, что нет метода, дающего стопроцентное совпадение с показаниями растений, а скорее тому, что все же находятся методы, способные для известного круга почв и растений давать совпадения до 80%».

В агрохимической службе России официально признано только шесть методов для определения подвижных форм фосфора и лишь три метода совместного определения обменного калия и фосфора:

- метод Кирсанова (0,2 н HCl);
- метод Чирикова (0,5 М CH₃COOH);
- метод Мачигина (1% (NH₄)₂CO₃) [3], самым главным преимуществом которого является возможность совместного определения как фосфора, так и калия.

На момент изучения почвенного покрова, свойств почвы, использовали как полевые, так и лабораторные методы. Системно методический подход позволил сформировать главные выводы. При проведении лабораторных исследований применялся сравнительно-аналитический метод.

Фосфаты определяли в образцах почвы, отобранных в 2015–2020 гг. Образцы отбирались послойно с шагом 20 см до глубины 1 м, время отбора – май.

В лабораторных условиях определяли следующие показатели:

- 1) pH водной вытяжки – потенциометрическим методом;
- 2) pH солевой вытяжки – по методу ЦИНАО (ГОСТ 26483-85) [44];
- 3) гидролитическая кислотность – по методу Каппена с потенциометрическим окончанием (ГОСТ 26212-91) [41];
- 4) сумма обменных оснований – по методу Каппена-Гильковица;
- 5) степень насыщенности основаниями – расчетным методом;
- 6) pH водной и солевой вытяжек – в насыщенных почвенных пастах*;
- 7) формы фосфора (общий, минеральный и органический) – по методу Сендерса-Вильямса;
- 8) подвижный фосфор – по методу Чирикова;

- 9) подвижный и обменный фосфор – по методу Брейя и Куртца;
- 10) ортофосфаты – по методу Карпинского и Замятиной;
- 11) гранулометрический состав – по Качинскому [31].

Считаем необходимым дать обоснование по использованию метода насыщенных почвенных паст*. К методам анализа жидкой фазы почв, причем исторически самым первым, следует также отнести метод водных вытяжек, называемых ранее почвенными растворами. Водные вытяжки широко используются в агрохимических анализах для определения запасов легкорастворимых солей в почвах и их изменений во времени. Однако они дают *слишком косвенную информацию о составе жидкой фазы почвы.*

Уже первые исследования величины рН в коллоидных системах столкнулись с выявленным Г. Вигнером и Х. Пальманом (цит. по [115]) суспензионным эффектом (СЭ), который в общем виде заключается в том, что концентрации (активности) ионов, определенные в суспензии и в выделенном затем центрифугированием или каким-либо иным способом почвенном растворе, различны. Более того, при потенциометрическом определении СЭ оказывает существенное влияние на результаты, т.к. равновесное состояние устанавливается медленно. Это обусловлено сложным составом почвенных суспензий. Наличие тонкодисперсного минерального материала, минеральных и органических коллоидов оказывает существенное влияние на СЭ.

Жидкая фаза представляет собой самый изменчивый компонент почвы. Это обусловлено, с одной стороны, множеством непосредственно воздействующих на нее факторов; с другой – практическим отсутствием инерционности ее состава, что обусловлено активностью растворенных форм элементов, незначительной долей их в сравнении с содержанием в твердой части и живом веществе и большой поверхностью соприкосновения жидкой фазы с другими компонентами почвы. Состав жидкой фазы почвы определяется как многокомпонентностью самой почвы, так и различными внешними воздействиями.

По свидетельству многочисленных исследований, с увеличением влажности почвы происходит рост величины рН. С учетом величины нерастворяющегося

объема такой рост должен опережать разбавление ионов водорода, особенно при невысокой влажности. При высокой влажности по мере разбавления возможны также процессы гидролиза, приводящие к резкому увеличению величины рН.

Существенное значение в этих случаях может иметь изменение коэффициента активности H^+ (резко снижающегося при больших концентрациях), что также приводит к непропорциональному увеличению рН с разбавлением. Это обстоятельство уже отмечено в работе А.В. Трофимова [152].

В 1930 г. 2-й Международный конгресс почвоведов принял в качестве стандартного при измерении рН соотношение 1 : 2,5. При этом соотношении почвы и воды, почвы и 1 М раствора KCl , как правило, проводят измерение рН в России и других странах бывшего СССР. В странах Европы, в США, Канаде, Австралии чаще используют соотношение почвы и воды 1 : 1, измеряют рН и при соотношении 1 : 2, 1 : 5, 1 : 10. Когда суспензию разводят, уменьшается суспензионный эффект, точность проведения измерения вырастает. *Однако при разбавлении суспензий нарушаются химические равновесия, свойственные реальным почвам, что, в свою очередь, влияет на измеряемый уровень рН. Разбавление суспензий часто приводит к увеличению рН.*

В США широкое применение получил метод насыщенных водой почвенных паст (saturated soil paste). Сущность метода заключается в том, что к почве добавляют наименьшее количество воды, которое позволяет получить фильтрат с помощью обычной техники [151]. Мы провели исследования и сравнение стандартных методик с методом насыщенных почвенных паст при определении рН водной и солевой вытяжек. Проведенные исследования доказали, что метод почвенных паст дает более точную картину физико-химического состояния почвы.

3 ВЛИЯНИЕ СИСТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ УДОБРЕНИЯ И ДЕФЕКАТА НА ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЧЕРНОЗЕМА ВЫЩЕЛОЧЕННОГО

Удобрения и дефекаат оказывают многостороннее воздействие на почвы, существенно изменяя почвенные режимы, состав и физико-химические свойства. Если удобрения способствуют значительному повышению содержания элементов питания (прямое действие), то являясь солями, они активно воздействуют на концентрацию почвенного раствора, почвенный поглощающий комплекс. Установлено, что длительное внесение удобрений способствует подкислению почв, поэтому в схему опыта включены варианты с мелиорантами, в том числе с дефекаатом.

В почвенных образцах определяли обменную, актуальную и гидролитическую кислотность, содержание обменных катионов, емкость катионного обмена (ЕКО) и степень насыщенности почв основаниями. Для характеристики состава и физико-химических свойств почвы опытного участка использовали данные, приведенные К.Е. Стекольниковым [139] (Таблица 2).

Таблица 2 – Состав и физико-химические свойства чернозема выщелоченного в исходном состоянии (1987 г.)

Горизонт	Мощность, см	Гумус, %	рН		S	Нг	Е	V, %
			Н ₂ O	KCl				
А _{пах}	26,0	4,58	6,55	5,57	29,94	4,34	33,78	88
А	19,0	3,63	6,73	5,60	26,74	3,32	29,42	88
АВ	20,5	2,22	6,98	5,95	25,49	1,80	26,99	93
В	27,0	1,16	7,24	6,10	24,27	1,41	24,91	94
ВС	39,0	0,68	7,75	6,70	Вскипает	Вскипает	Вскипает	100
С	33,5	0,37	8,25	7,13	Вскипает	Вскипает	Вскипает	100

Примечание: числитель – минимум и максимум, знаменатель – среднее.

Усредненные данные физико-химических параметров изучаемой почвы дают вполне объективную их характеристику в исходном состоянии. По мощности гумусного слоя (65,5 см) изучаемая почва среднемошная, а по содержанию гумуса в пахотном слое малогумусная [74]. По реакции среды рН водной вытяжки почва

нейтральная, что не совсем характерно для данного подтипа чернозема. Это обусловлено высоким уровнем сезонного залегания границы вскипания – практически в пределах нижней части гумусового горизонта, что является нетипичным для чернозема выщелоченного, однако в нашем случае оно обусловлено не высоким залеганием карбонатов, а их сезонной миграционной формой.

Водный режим черноземов выщелоченных характеризуется частично промывным типом [143]. Ранней весной и осенью вследствие избыточного увлажнения атмосферными осадками нисходящий ток влаги может выщелачивать почвенные карбонаты за пределы почвенного профиля на глубину 120–150 см. В летний период наблюдается преобладание восходящих токов влаги над нисходящими. Эти условия создаются практически ежегодно, на что указывают наши данные (см. климадиаграммы, Рисунок 8). Формируется пульсирующий режим влаги и карбонатов. Восходящие токи влаги вызывают протекание реакции растворения и перенос хорошо растворимого гидрокарбоната кальция из карбонатного в нижнюю часть гумусового горизонта, что и обуславливает проявление в нем сезонного вскипания [165].



С капиллярной каймой гидрокарбонаты кальция могут перемещаться до хорошо аэрируемой части профиля и, взаимодействуя с CO_2 , переходят в нерастворимую форму CaCO_3 . Это мелкокристаллическая форма карбонатов в капиллярах, т.е. типичный псевдомицелий. В нижней части профиля он наблюдается в засушливые периоды. В годы с достаточным увлажнением почвенного профиля карбонаты выщелачиваются за пределы почвенного профиля, поэтому в 60–70-х годах прошлого столетия подтип чернозема выщелоченного различали по степени выщелоченности – отрыву линии вскипания от нижней границы гумусового горизонта на < 20, 20–40 и > 40 см, т.е. слабо-, средне- и сильновыщелоченные соответственно. Однако с учетом миграционных форм карбонатов эта концепция оказалась несостоятельной.

Величина обменной кислотности варьирует от слабо кислой до близкой к нейтральной – 5,57–7,13. В широком диапазоне варьирует и величина гидролити-

ческой кислотности – 1,41–4,34 мг-экв/100 г почвы. В исходном состоянии изучаемая почва имела высокую сумму обменных оснований в пахотном слое – 33,78 мг-экв/100 г почвы.

Указанное варьирование физико-химических показателей обусловило и значительное колебание степени насыщенности основаниями – 88–94%. Низкая для черноземов степень насыщенности основаниями обусловлена высокой величиной обменной и гидролитической кислотности. Во временных рекомендациях по мелиорации почв с повышенной кислотностью отмечено, что при величине $pH_{\text{сол}} < 5,5$, гидролитической кислотности $> 3,5$ мг-экв/100 г почвы и степени насыщенности основаниями $< 83\%$ чернозем нуждается в известковании [28], поэтому в схему опыта были включены варианты, предусматривающие внесение дефеката.

Подвижность и доступность растениям различных форм фосфора определяется физико-химическими условиями и, прежде всего, режимом кислотности и суммы обменных оснований. Именно этим обусловлена необходимость выявления влияния систем применения удобрений и дефеката на физико-химические свойства изучаемой почвы.

Как уже отмечалось выше, актуальная кислотность очень динамична во времени и пространстве, что подтверждают полученные нами данные. Прежде всего, следует отметить, что pH водной вытяжки изменяется по годам наблюдений и по вариантам опыта. Эти изменения затрагивают не только верхние слои почвы, но и весь почвенный профиль. И если ее изменение по годам наблюдений определяются главным образом гидротермическими условиями, то изменения по вариантам опыта обусловлены системой применения удобрения и дефеката.

Кроме того, по нашему мнению, на величину pH водной вытяжки оказывает влияние высокое отношение почвы к раствору, равное 1 : 2,5, которое используется в стандартной вытяжке. Мы в своей работе воспользовались методикой определения pH водной и солевой вытяжек в насыщенных почвенных пастах. В таблице 3 приводим данные по определению pH в насыщенных водой почвенных пастах при соотношении почва : раствор = 1 : 0,5.

Таблица 3 – Изменение рН в насыщенных водой почвенных пастах под влиянием удобрений и дефеката

Варианты опыта	Слой, см	Годы					
		2015	2016	2017	2018	2019	2020
Контроль	0–20	5,44	5,37	5,72	5,93	5,80	6,21
	20–40	5,62	4,97	5,59	6,05	6,03	5,98
	40–60	6,03	5,55	5,71	6,14	6,98	6,29
	60–80	5,90	5,98	5,89	6,23	7,30	6,38
	80–100	6,20	6,08	6,05	7,30	7,58	6,75
Фон органический 40 т/га навоза	0–20	5,45	5,26	5,13	5,63	5,91	5,80
	20–40	4,65	5,00	5,21	5,94	5,99	5,75
	40–60	6,00	5,18	5,66	6,13	6,38	5,66
	60–80	6,30	5,65	5,94	6,73	7,21	6,28
	80–100	6,14	5,97	6,26	6,91	7,33	6,26
Фон + 1NPK	0–20	4,99	4,89	5,14	5,36	6,08	5,53
	20–40	4,98	5,08	5,19	5,44	5,99	5,74
	40–60	5,78	5,77	5,72	5,93	6,27	6,15
	60–80	5,49	5,97	5,98	6,97	6,56	6,30
	80–100	5,82	6,11	6,32	7,59	7,63	6,37
Фон + 2NPK	0–20	5,32	4,92	5,08	5,31	5,50	5,38
	20–40	5,02	5,05	5,12	5,17	5,86	5,58
	40–60	5,07	5,36	5,72	5,84	6,37	5,87
	60–80	5,54	5,56	6,09	6,17	7,07	6,10
	80–100	5,39	6,15	7,18	7,29	7,53	6,16
Фон + дефекат	0–20	6,62	6,29	6,40	6,62	6,44	6,40
	20–40	6,70	6,21	6,35	6,48	6,49	6,54
	40–60	6,19	6,10	6,17	6,37	6,04	6,73
	60–80	6,43	6,31	6,23	6,49	6,43	6,78
	80–100	6,71	6,55	7,20	6,85	7,69	7,37
Дефекат + 1NPK	0–20	6,47	5,97	5,96	6,27	5,89	6,19
	20–40	6,01	5,76	6,20	6,01	6,13	6,15
	40–60	5,91	6,21	6,22	6,36	6,40	6,42
	60–80	6,40	6,34	6,25	6,87	6,58	6,79
	80–100	6,76	6,46	6,76	7,41	6,70	7,50
НСР ₀₅		0,53					

В соответствии с общепринятой методикой оценки величины рН пахотного слоя варьируют по годам исследований и на вариантах опыта были выше, чем при определении в насыщенных пастах. По результатам определения рН в насыщенных водой почвенных пастах нами выявляются следующие закономерности.

На контроле рН водной вытяжки находилась в интервале 5,37 (2016 г.) – 6,21 (2020 г.), т.е. варьировала от слабокислой до нейтральной. На варианте органической системы удобрения рН водной вытяжки в пахотном слое за изучаемый период изменялась от 5,13 (2017 г.) до 5,91 (2019 г.), т.е. являлась слабокислой, поэтому мы можем заключить, что на этом варианте наблюдается подкисление.

На варианте с органо-минеральной системой применения удобрения с одинарной дозой минеральных удобрений рН изменялась в пределах от 4,99 (2015 г.) до 6,08 (2019 г.), т.е. варьировала от среднекислой до нейтральной. В данном случае есть основания для утверждения о подкислении пахотного слоя изучаемой почвы.

На варианте орано-минеральной системы применения удобрения с двойной дозой минеральных удобрений рН изменялась от 4,92 (2016 г.) до 5,50 (2019 г.), т.е. варьировала от среднекислой до слабокислой. Таким образом, можно отметить, что на данном варианте подкисление пахотного слоя было выражено в наибольшей степени.

Совершенно иное положение мы наблюдаем на вариантах применения дефеката, и это при том, что наблюдается его последствие. Так, величина рН варьировала на варианте с дефекатом по органическому фону в пределах 6,29–6,28, т.е. за весь период наблюдений оставалась нейтральной. На варианте с дефекатом совместно с одинарной дозой минеральных удобрений рН в пахотном слое изменялась в пределах 5,96–6,47, т.е. варьировала от слабокислой (2016, 2017 и 2019 гг.) до нейтральной. В данном случае есть основания сделать заключение о том, что в последствии дефекат, применяемый с одинарной дозой минеральных удобрений, не полностью компенсирует подкисление почвы. Представляет интерес и характер изменения величины рН по профилю под влиянием систем применения удобрения.

Наиболее наглядно это представлено на рисунке 9, тем более что приведенные данные подтверждают и характер изменения величины рН по профилю изучаемой почвы, что представляет несомненный интерес.

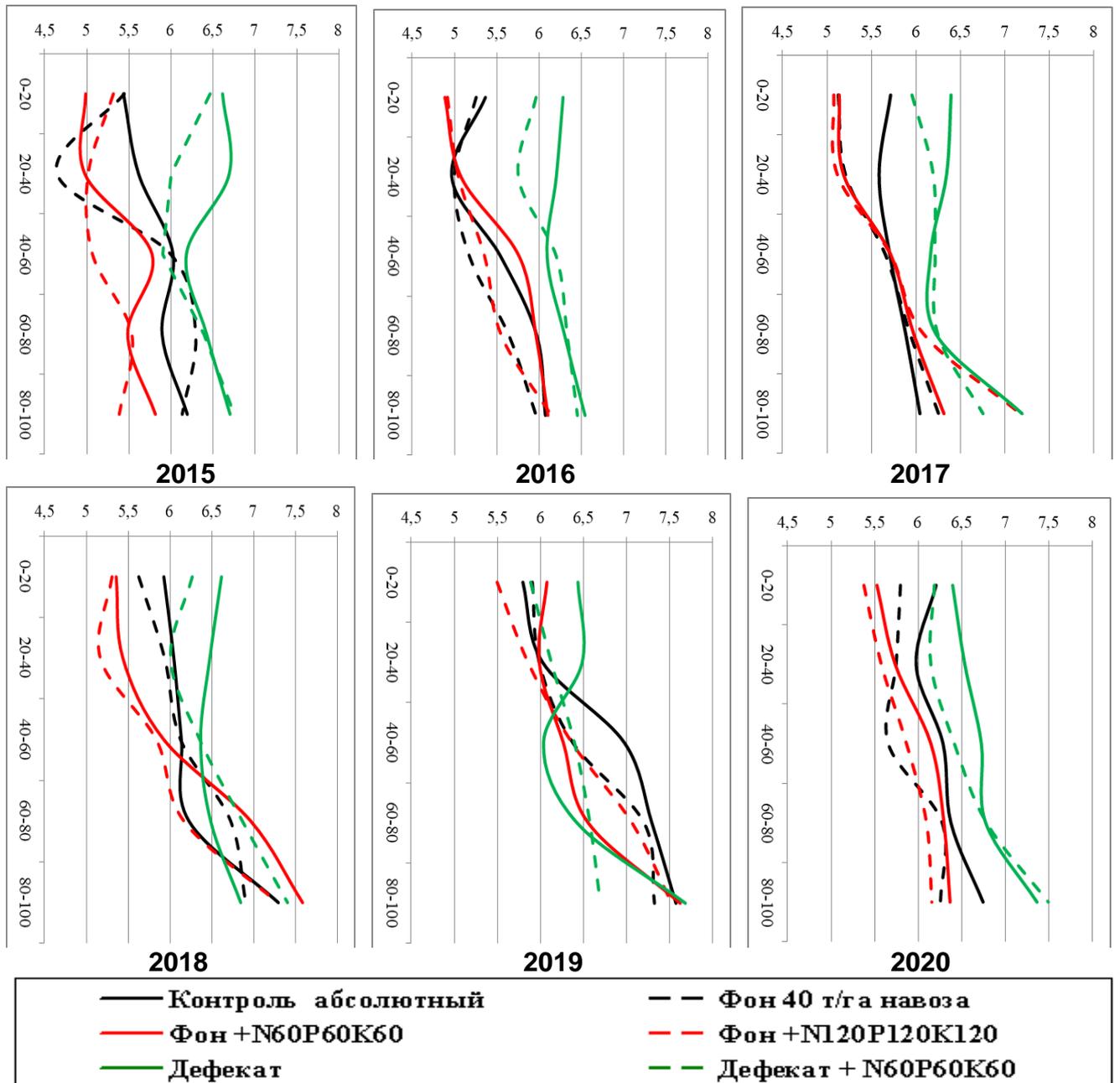


Рисунок 9 – Изменение pH насыщенных водой почвенных паст под влиянием применения систем удобрения и дефеката

В пахотном слое почвы образуются три группы с минимальными, средними и максимальными величинами pH. Минимальные величины pH наблюдаются на вариантах опыта с одинарной и двойной дозами минеральных удобрений по органическому фону. Мы наблюдаем четко выраженное подкисление слоя почвы 40–60 см, т.е. гумусового горизонта. Максимальные величины pH выявлены на вариантах с дефекатом, т.е. даже в последствии он компенсирует подкисление изучаемой почвы. Варианты контроля и органического фона занимают промежуточное положение.

Как мы уже отмечали выше, влияние систем применения удобрения и дефеката проявляется в изменениях рН в слое 0–20 см. Применение органической и органоминеральной систем удобрения обуславливает существенное подкисление почвы пахотного слоя, а дефекат его компенсирует. Но величина рН весьма динамична и по всему профилю изучаемой почвы. Характер изменения рН насыщенных водой почвенных паст по профилю неодинаков на вариантах опыта. В сравнении с вариантом контроля на вариантах опыта применения удобрения наблюдается снижение величины рН в слое 0–40 см. В наибольшей степени это характерно для вариантов с органоминеральной системой удобрения. На вариантах с дефекатом, наоборот, отмечается более высокая величина рН как по отношению к контролю, так и с удобренными вариантами. Вниз по профилю отмечается повышение рН. Максимальная величина отмечается в слое 80–100 см на всех вариантах и особенно на вариантах применения дефеката. Характер изменения рН по профилю практически на всех вариантах опыта элювиально-иллювиальный. Степень дифференциации профиля по рН максимальная на вариантах с органоминеральной системой удобрения и минимальная на вариантах с дефекатом.

В таблице 4 приведены данные по изменению рН стандартной водной вытяжки под влиянием удобрений и дефеката. Отметим, что рН в стандартной водной вытяжке заметно выше, чем в насыщенных водой почвенных пастах. На наш взгляд, это является следствием разбавления. Если рН в почвенной пасте определяется при 50% влажности, т.е. возможной в естественных условиях, то в стандартной вытяжке это 250% влажность, что в естественных условиях просто невозможно и, как следствие, менее достоверно. Так, на варианте контроля рН стандартной водной вытяжки в пахотном слое изменялась в пределах 5,63–6,73, т.е. она по существующей градации была близкой к нейтральной и нейтральной. На варианте с органической системой удобрения рН варьировала в пределах 5,48–7,00, т.е. оценивалась как слабокислая и нейтральная. На варианте с органоминеральной системой удобрения и одинарной дозой минеральных удобрений рН изменялась в пределах 5,11–6,77 и оценивалась как слабокислая и нейтральная. На варианте этой системы удобрения с двойной дозой минеральных удобрений рН варьировала в пределах 5,13–6,88, т.е. оценивалась как слабокислая и нейтральная.

Таблица 4 – Изменение рН в стандартной вытяжке (соотношение почва : раствор = 1 : 2,5) под влиянием удобрений и дефеката

Варианты опыта	Слой, см	Годы					
		2015	2016	2017	2018	2019	2020
Контроль	0–20	6,21	5,63	6,02	6,30	6,73	6,31
	20–40	5,98	5,33	5,95	6,39	6,68	6,17
	40–60	6,29	5,67	6,26	6,45	7,33	6,28
	60–80	6,38	5,73	6,43	6,57	7,70	6,42
	80–100	6,75	6,18	6,48	7,54	7,79	6,83
Фон органический 40 т/га навоза	0–20	5,80	5,48	5,74	6,24	7,00	6,04
	20–40	5,75	5,31	5,77	6,42	6,77	6,88
	40–60	5,66	5,38	6,22	6,54	6,79	5,94
	60–80	6,28	5,73	6,47	7,20	7,62	6,49
	80–100	6,26	6,19	6,73	7,23	7,80	6,58
Фон + 1NPK	0–20	5,53	5,11	5,73	5,87	6,77	5,79
	20–40	5,74	5,27	5,76	5,79	6,68	6,07
	40–60	6,15	5,88	6,33	6,23	6,66	6,39
	60–80	6,30	6,09	6,42	7,28	6,96	6,63
	80–100	6,37	6,24	6,73	7,85	7,78	6,59
Фон + 2NPK	0–20	5,38	5,13	5,62	6,09	6,88	5,78
	20–40	5,58	5,28	5,69	5,73	6,67	5,86
	40–60	5,87	5,49	6,32	6,28	6,83	6,21
	60–80	6,10	5,78	6,53	6,53	7,54	6,33
	80–100	6,16	6,27	7,59	7,79	7,86	6,48
Фон + дефекат	0–20	6,40	6,38	6,82	7,22	7,19	6,69
	20–40	6,54	6,33	6,79	6,98	7,21	6,87
	40–60	6,73	6,24	6,60	6,88	6,89	6,99
	60–80	6,78	6,46	6,72	6,92	7,08	7,04
	80–100	7,37	6,69	7,81	7,14	7,89	7,78
Дефекат + 1NPK	0–20	6,19	6,21	6,58	6,64	6,69	6,66
	20–40	6,15	5,90	6,44	6,49	6,64	6,53
	40–60	6,42	6,33	6,62	6,63	6,73	6,85
	60–80	6,79	6,49	6,73	7,17	7,03	7,04
	80–100	7,50	6,58	6,93	7,85	7,10	7,83
НСР ₀₅		0,60					

Таким образом, выявленное нами подкисление на вариантах с удобрениями не столь явное, как по данным определений рН в насыщенных водой почвенных пастах. Считаем, что это имеет принципиальный характер, так как степень подкисления при использовании стандартной вытяжки явно занижается. А ведь это, несомненно, имеет значение при оценке физико-химического состояния изучае-

мой почвы. Обратимся к существующей группировке почв по степени кислотности (Таблица 5).

Таблица 5 – Группировка почв по степени кислотности и сумме обменных оснований

Кислотность почвы	рН		Нг, мг-экв/100 г почвы	Сумма обменных оснований мг-экв/100 г почвы	
	H ₂ O	KCl			
Очень сильнокислые	–	< 4	> 6	Очень низкая	0–5,0
Сильнокислые	3–4	4,1–4,5	5,1–6,0	Низкая	5,1–10,0
Среднекислые	4–5	4,6–5,0	4,1–5,0	Средняя	10,1–15,0
Слабокислые	5–6	5,1–5,5	3,1–4,0	Повышенная	15,1–20,0
Близкие к нейтральным	–	5,6–6,0	2,1–3,0	Высокая	20,1–30,0
Нейтральные	7	> 6,0	< 2,0	Очень высокая	> 30,0
Слабощелочные	7–8	–	–		
Щелочные	8–9	–	–		
Сильнощелочные	9–11	–	–		

Данные таблицы 5 показывают, что использование стандартной водной вытяжки по сравнению с насыщенными водой почвенными пастами смещают оценку выявленного эффекта подкисления на одну градацию в сторону понижения. Таким образом, эффект подкисления от применения систем удобрения существенно занижается, что как мы уже отмечали, имеет принципиальный характер. Ведь при обосновании необходимости проведения известкования принимаются во внимание все показатели кислотности. Завышение величины рН водной и солевой вытяжки в стандартных соотношениях почва : раствор, равном 1 : 2,5, приводит к уменьшению площади почв, нуждающихся в известковании.

Это различие наиболее наглядно при сопоставлении значений рН водной вытяжки, определенной в насыщенных водой пастах и в стандартной вытяжке, представлено в таблице 6.

Анализ данных таблицы 6 показывает, что на вариантах применения органической и особенно органоминеральной систем удобрения величина рН водной вытяжки ниже, чем на неудобренном варианте, а на вариантах с дефекатом она существенно выше, чем на всех вариантах. Следует отметить, что последний раз дефекаат вносился в 2005 г., т.е. мы наблюдаем его последствие. Тем не менее даже в последствии дефекаат способствует стабилизации активной кислотности

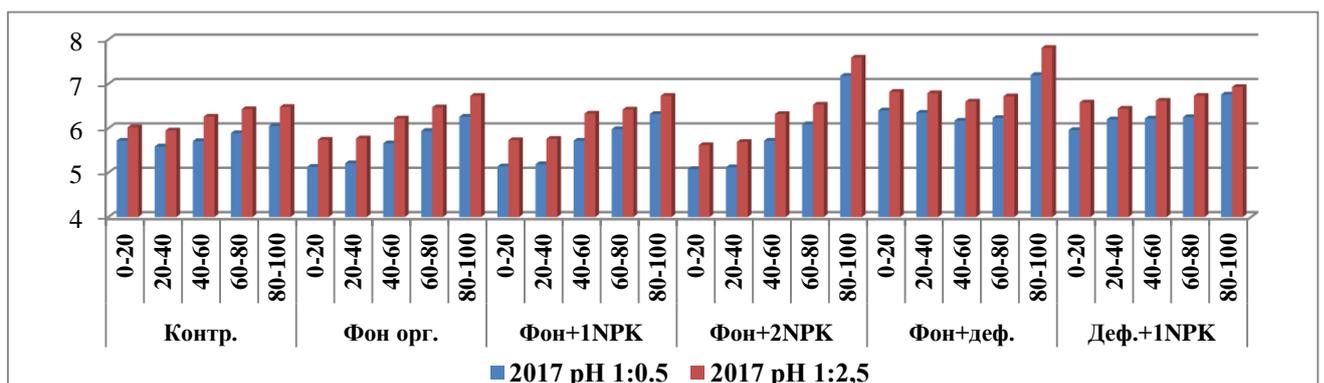
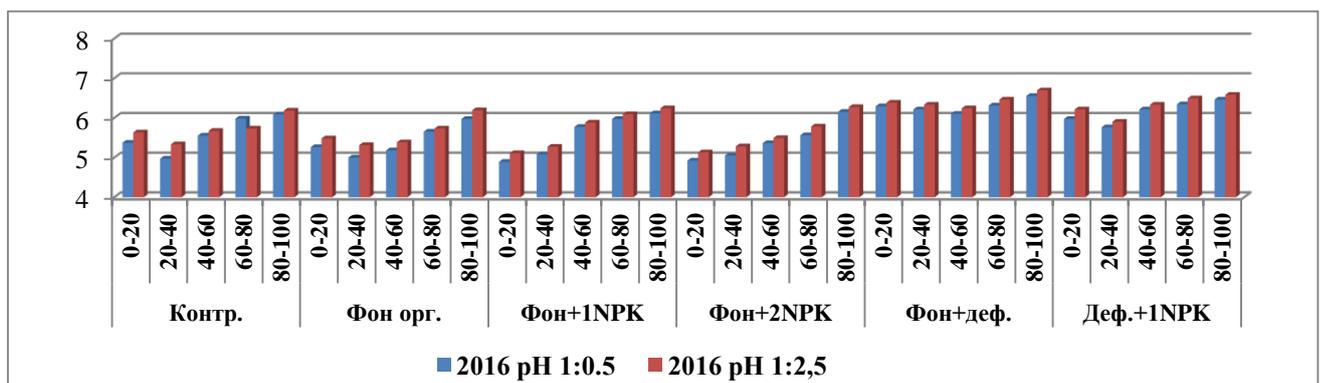
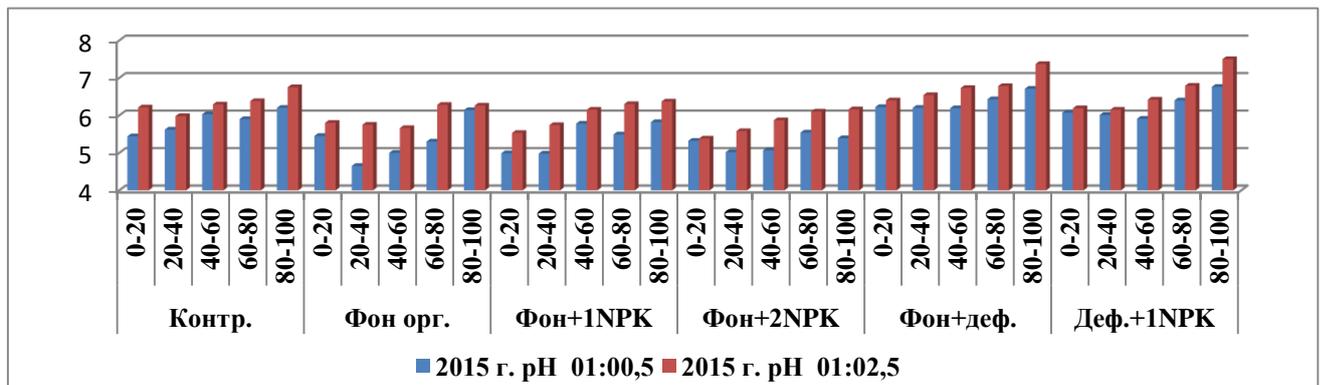
на оптимальном уровне. Общей закономерностью является понижение величины рН в слое 20–40 см на всех вариантах, за исключением вариантов с дефекатом, почти по всем годам наблюдений, особенно в насыщенных водой почвенных пастах при соотношении почва : раствор = 1 : 0,5.

Таблица 6 – Влияние разбавления на величину рН водной вытяжки

Варианты опыта	Слой, см	Годы											
		2015		2016		2017		2018		2019		2020	
		рН 1:0,5	рН 1:2,5										
Контроль	0–20	5,44	6,21	5,37	5,63	5,72	6,02	5,93	6,30	5,80	6,73	6,21	6,31
	20–40	5,62	5,98	4,97	5,33	5,59	5,95	6,05	6,39	6,03	6,68	5,98	6,17
	40–60	6,03	6,29	5,55	5,67	5,71	6,26	6,14	6,45	6,98	7,33	6,29	6,28
	60–80	5,90	6,38	5,98	5,73	5,89	6,43	6,23	6,57	7,30	7,70	6,38	6,42
	80–100	6,20	6,75	6,08	6,18	6,05	6,48	7,30	7,54	7,58	7,79	6,75	6,83
Фон органический	0–20	5,45	5,80	5,26	5,48	5,13	5,74	5,63	6,24	5,91	7,00	5,80	6,04
	20–40	4,65	5,75	5,00	5,31	5,21	5,77	5,94	6,42	5,99	6,77	5,75	6,88
	40–60	6,00	5,66	5,18	5,38	5,66	6,22	6,13	6,54	6,38	6,79	5,66	5,94
	60–80	6,30	6,28	5,65	5,73	5,94	6,47	6,73	7,20	7,21	7,62	6,28	6,49
	80–100	6,14	6,26	5,97	6,19	6,26	6,73	6,91	7,23	7,33	7,80	6,26	6,58
Фон + НРК60	0–20	4,99	5,53	4,89	5,11	5,14	5,73	5,36	5,87	6,08	6,77	5,53	5,79
	20–40	4,98	5,74	5,08	5,27	5,19	5,76	5,44	5,79	5,99	6,68	5,74	6,07
	40–60	5,78	6,15	5,77	5,88	5,72	6,33	5,93	6,23	6,27	6,66	6,15	6,39
	60–80	5,49	6,30	5,97	6,09	5,98	6,42	6,97	7,28	6,56	6,96	6,30	6,63
	80–100	5,82	6,37	6,11	6,24	6,32	6,73	7,59	7,85	7,63	7,78	6,37	6,59
Фон + НРК120	0–20	5,32	5,38	4,92	5,13	5,08	5,62	5,31	6,09	5,50	6,88	5,38	5,78
	20–40	5,02	5,58	5,05	5,28	5,12	5,69	5,17	5,73	5,86	6,67	5,58	5,86
	40–60	5,07	5,87	5,36	5,49	5,72	6,32	5,84	6,28	6,37	6,83	5,87	6,21
	60–80	5,54	6,10	5,56	5,78	6,09	6,53	6,17	6,53	7,07	7,54	6,10	6,33
	80–100	5,39	6,16	6,15	6,27	7,18	7,59	7,29	7,79	7,53	7,86	6,16	6,48
Фон + дефекат	0–20	6,62	6,40	6,29	6,38	6,40	6,82	6,62	7,22	6,44	7,19	6,40	6,69
	20–40	6,70	6,54	6,21	6,33	6,35	6,79	6,48	6,98	6,49	7,21	6,54	6,87
	40–60	6,19	6,73	6,10	6,24	6,17	6,60	6,37	6,88	6,04	6,89	6,73	6,99
	60–80	6,43	6,78	6,31	6,46	6,23	6,72	6,49	6,92	6,43	7,08	6,78	7,04
	80–100	6,71	7,37	6,55	6,69	7,20	7,81	6,85	7,14	7,69	7,89	7,37	7,78
Дефекат + НРК60	0–20	6,47	6,19	5,97	6,21	5,96	6,58	6,27	6,64	5,89	6,69	6,19	6,66
	20–40	6,01	6,15	5,76	5,90	6,20	6,44	6,01	6,49	6,13	6,64	6,15	6,53
	40–60	5,91	6,42	6,21	6,33	6,22	6,62	6,36	6,63	6,40	6,73	6,42	6,85
	60–80	6,40	6,79	6,34	6,49	6,25	6,73	6,87	7,17	6,58	7,03	6,79	7,04
	80–100	6,76	7,50	6,46	6,58	6,76	6,93	7,41	7,85	6,70	7,10	7,50	7,83

Наиболее наглядно это представлено на рисунке 10.

Как мы уже отмечали выше, величина рН водной вытяжки зависит от гидротермических условий наблюдаемого периода. Так, в годы с достаточным увлажнением, например в 2017 г., наблюдались наибольшие различия при определении рН в насыщенных водой почвенных пастах и в суспензиях. В годы с дефицитом увлажнения эти различия уменьшаются, но они есть и не учитывать их нельзя. Еще более значимые различия наблюдаются при определении рН солевой вытяжки в насыщенных пастах и стандартной солевой вытяжке при соотношении почва : раствор = 1 : 2,5. Как и величина актуальной кислотности, обменная кислотность очень динамична во времени и пространстве. На нее, конечно, оказывают влияние как внешние воздействия, т.е. режим влажности и температуры, так и применяемые удобрения и дефекат.



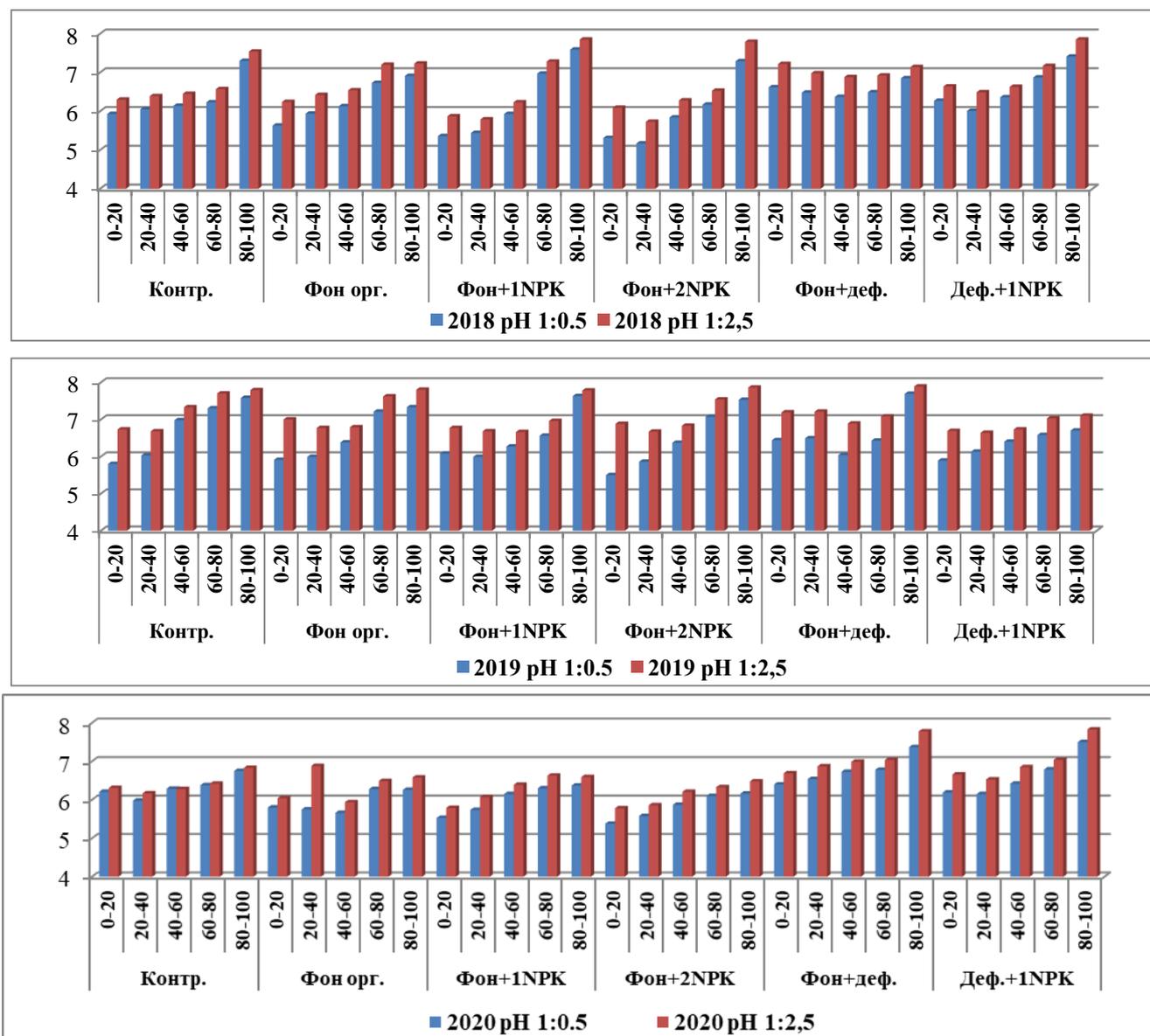


Рисунок 10 – Влияние степени разбавления на величину рН водной вытяжки

В таблице 7 приведены данные по определению рН солевой вытяжки в насыщенных пастах. Все закономерности, выявленные по влиянию систем удобрения и дефеката на рН водной вытяжки, подтверждаются и при определении рН солевой вытяжки, просто они проявляются более явно. Анализ данных таблицы 7 показывает, что выявленные закономерности по влиянию систем удобрения и дефеката подтверждаются и данными анализа солевой вытяжки. Так, в пахотном слое контрольного варианта рН солевой насыщенной пасты изменялась от 4,49 до 5,19 и оценивалась как сильно- и слабокислая (Таблица 5). На варианте органической системы удобрения она изменялась в пределах 4,17–4,78 и оценивалась как сильно- и среднекислая. На варианте органоминеральной системы удобрения с

одинарной дозой минеральных удобрений рН варьировала в пределах 3,89–4,80 и оценивалась как очень сильноокислая и среднеокислая. На варианте с органоминеральной системой удобрения с двойной дозой минеральных удобрений рН составляла 3,75–4,78 и оценивалась как очень сильноокислая и среднеокислая. Таким образом, внесение органических и особенно органоминеральных удобрений обуславливает сильно выраженное повышение обменной кислотности.

Таблица 7 – Изменение величины рН солевой вытяжки (при соотношении почва : раствор = 1 : 0,5) под влиянием удобрений и дефеката

Варианты опыта	Слой, см	Годы					
		2015	2016	2017	2018	2019	2020
Контроль	0–20	4,49	4,54	4,58	5,19	4,63	5,03
	20–40	4,73	4,23	4,90	5,17	5,07	4,87
	40–60	5,11	4,77	4,95	5,38	6,32	4,98
	60–80	5,03	4,96	5,14	5,27	6,78	5,22
	80–100	5,43	5,20	5,27	6,73	6,93	5,61
Фон органический 40 т/га навоза	0–20	4,51	4,17	4,41	4,78	4,64	4,70
	20–40	4,27	4,02	4,47	5,27	4,97	4,72
	40–60	4,96	4,17	4,93	5,23	5,39	4,61
	60–80	5,45	4,44	4,96	5,87	6,60	5,02
	80–100	5,72	4,77	5,27	6,11	6,58	5,26
Фон + N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀	0–20	4,21	3,89	4,22	4,51	4,80	4,46
	20–40	4,17	4,10	4,30	4,58	5,09	4,64
	40–60	4,91	4,53	4,77	5,01	5,28	4,91
	60–80	4,93	4,73	5,01	6,22	5,73	5,17
	80–100	4,97	4,85	5,46	7,01	6,82	5,28
Фон + N ₁₂₀ P ₁₂₀ K ₁₂₀	0–20	4,78	3,75	4,23	4,43	4,60	4,26
	20–40	4,31	3,94	4,31	4,35	4,78	4,59
	40–60	4,82	4,30	4,84	4,96	5,29	4,93
	60–80	4,80	4,54	5,09	5,51	6,24	4,82
	80–100	4,86	4,66	6,42	6,68	6,79	4,91
Фон + дефекат	0–20	5,47	5,16	5,44	5,81	5,36	5,38
	20–40	5,33	5,29	5,36	5,68	5,24	5,53
	40–60	5,17	4,99	5,22	5,41	5,10	5,57
	60–80	5,46	5,07	5,25	5,52	5,14	5,52
	80–100	5,63	5,22	6,44	5,79	6,82	6,60
Дефекат + N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀	0–20	5,15	4,86	5,03	5,38	4,81	5,21
	20–40	5,30	4,71	5,10	5,16	5,13	5,27
	40–60	5,38	5,06	5,13	5,44	5,34	5,31
	60–80	5,42	5,28	5,26	5,86	5,47	5,54
	80–100	5,47	5,40	5,47	6,77	5,59	6,73
НСР ₀₅		0,60					

На варианте применения дефектата по органическому фону рН солевой вытяжки в пахотном слое варьировала в пределах 5,16–5,81, т.е. оценивалась как слабокислая и близкая к нейтральной, а на варианте применения дефектата совместно с одинарной дозой минеральных удобрений – 5,15–5,38 или слабокислая. Таким образом, даже в последствии дефектат способствует снижению обменной кислотности. Характер изменения рН солевой вытяжки под влиянием систем удобрения и дефектата в насыщенных пастах по профилю изучаемой почвы представлен на рисунке 11.

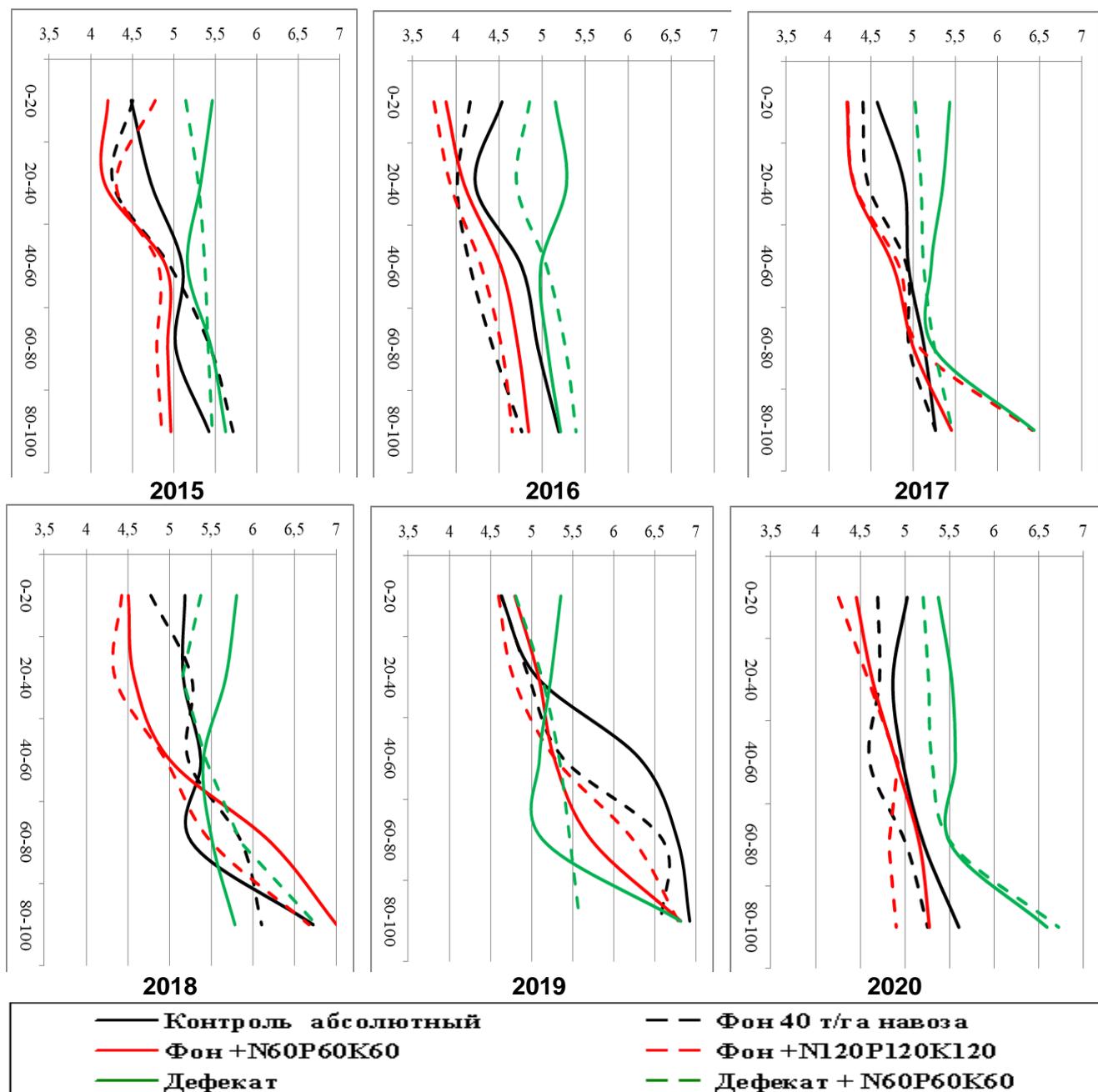


Рисунок 11 – Изменение рН солевой вытяжки в насыщенных почвенных пастах под влиянием систем удобрения и дефектата

Как следует из данных рисунка 11, рН солевой вытяжки в насыщенных пастах очень сильно варьирует как по вариантам опыта, так и по профилю. И если на абсолютном контроле и вариантах с удобрениями характер изменения рН солевой вытяжки по профилю преимущественно элювиально-иллювиальный, то на вариантах с дефекатом модальный [12, 142]. Как и в случае с рН водной вытяжки в годы с дефицитом увлажнения наблюдается резкий рост рН солевой вытяжки в нижней части профиля практически на всех вариантах. Это обусловлено поднятием миграционных форм карбонатов иногда до нижней границы гумусового горизонта. При этом следует отметить, что степень дифференциации профиля по величине рН солевой вытяжки на вариантах с дефекатом минимальная в сравнении с остальными.

Следует также отметить, что, как и в случае с рН водной вытяжки, наблюдается формирование трех групп вариантов по величине рН солевой вытяжки. Максимальные величины рН солевой вытяжки наблюдались на вариантах с дефекатом, а минимальные – на вариантах с минеральными удобрениями, т.е. наблюдалась четко выраженное подкисление на этих вариантах опыта [165]. Варианты контроля и органического фона занимали промежуточное положение. Однако следует отметить, что на варианте органического фона наблюдалось подкисление относительно контрольного варианта. Сохраняется та же закономерность, как и по величине рН водной вытяжки.

Как мы уже отмечали, величина рН солевой стандартной вытяжки, как и в случае с рН водной вытяжки, существенно завышена. Данные представлены в таблице 8.

Как следует из данных таблицы 8, величина рН солевой стандартной вытяжки существенно выше, чем в насыщенных пастах. Так, в пахотном слое контрольного варианта она изменялась в пределах 5,21–6,67, т.е. оценивается как слабокислая и нейтральная. На варианте с органической системой удобрения она варьирует в пределах 5,18–5,78 и оценивается как слабокислая и близкая к нейтральной. Но абсолютные величины заметно ниже, чем на контроле. На варианте органоминеральной системы удобрения с одинарной дозой минеральных

удобрений рН солевой вытяжки изменялась в пределах 5,03–5,98 и оценивалась как среднекислая и близкая к нейтральной. Наибольшее подкисление наблюдалось на варианте органоминеральной системы удобрения с двойной дозой минеральных удобрений, где рН солевой вытяжки варьировала в пределах 4,17–5,47 и оценивалась как сильно- и слабокислая.

Таблица 8 – Изменение величины рН солевой вытяжки (при соотношении почва : раствор = 1 : 2,5) под влиянием удобрений и дефеката

Варианты опыта	Слой, см	Годы					
		2015	2016	2017	2018	2019	2020
Контроль	0–20	5,63	5,21	5,57	6,67	5,24	5,85
	20–40	5,59	4,80	5,69	5,86	5,63	5,43
	40–60	5,98	5,16	5,99	5,89	6,75	5,64
	60–80	6,01	5,20	6,10	5,79	7,17	5,75
	80–100	6,18	5,37	6,30	7,09	7,28	6,07
Фон органический 40 т/га навоза	0–20	5,78	4,60	5,27	5,37	5,75	5,18
	20–40	5,21	4,50	5,44	5,68	5,43	5,21
	40–60	5,83	4,64	5,71	5,73	5,84	5,08
	60–80	6,12	4,89	5,98	6,36	7,05	5,46
	80–100	6,02	5,18	6,17	6,54	7,29	5,78
Фон + N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀	0–20	5,14	5,38	5,03	5,01	5,98	4,91
	20–40	5,34	4,56	5,09	4,98	5,88	5,08
	40–60	5,66	4,90	5,62	5,46	5,87	5,38
	60–80	5,79	5,05	6,03	6,59	6,18	5,58
	80–100	5,90	5,19	6,42	7,38	7,16	5,83
Фон + N ₁₂₀ P ₁₂₀ K ₁₂₀	0–20	5,44	4,17	5,08	5,47	5,33	4,68
	20–40	5,31	4,35	5,07	4,86	5,36	4,99
	40–60	5,48	4,72	5,88	5,43	5,92	5,34
	60–80	5,57	5,09	6,14	6,07	6,78	5,21
	80–100	5,56	5,09	6,85	7,13	7,21	5,30
Фон + дефекат	0–20	6,17	5,65	6,43	6,37	6,87	5,89
	20–40	6,15	5,74	6,33	6,22	6,41	5,98
	40–60	6,00	5,52	6,31	5,81	5,90	6,08
	60–80	6,05	5,57	6,28	6,09	6,17	5,97
	80–100	6,33	5,66	7,07	6,28	7,19	6,92
Дефекат + N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀	0–20	6,10	5,34	6,16	5,85	6,03	5,92
	20–40	6,09	5,11	6,18	5,60	5,76	5,83
	40–60	6,01	5,62	6,21	5,97	5,87	5,87
	60–80	6,15	5,73	6,47	6,48	5,98	6,05
	80–100	6,21	5,77	6,59	7,30	6,12	7,07
НСР ₀₅		0,62					

На варианте с дефекатом по органическому фону наблюдали четко выраженное последствие дефеката, проявляющееся в нейтрализации обменной кислотности до уровня 5,65–6,83, т.е. близкой к нейтральной и нейтральной. Последствие дефеката, примененного совместно с одинарной дозой минеральных удобрений, проявлялось не столь явно, однако подкисление гораздо ниже, чем на контроле и особенно на удобренных вариантах, рН солевой вытяжки изменялась в пределах 5,34–6,16, т.е. оценивалась как слабокислая и нейтральная. Наибольшие различия величин рН солевой вытяжки, определенных в почвенных пастах и стандартных условиях, наблюдались в верхней части профиля, вниз по профилю они уменьшаются.

Выявленные закономерности по влиянию степени разбавления на величину актуальной кислотности проявляются и при исследовании обменной кислотности, но они более выражены. Данные определения рН солевой вытяжки в насыщенных водой пастах и в стандартной вытяжке приведены в таблице 9 и на рисунке 12.

Анализ данных таблицы 9 показывает, что обменная кислотность, как и актуальная, весьма изменчива как во времени, так и в пространстве. Ее изменения во времени зависят от гидротермических условий, а по профилю изучаемой почвы – от применяемых систем удобрения и дефеката.

Следует отметить, что различия величины рН солевой вытяжки, определенной в насыщенных почвенных пастах и при стандартном соотношении, достигает более 1 единицы рН, причем это наблюдается на всех вариантах опыта, за исключением вариантов с применением дефеката, значения рН ниже. Эти различия, в отличие от величины рН водной вытяжки, имеют уже принципиальный характер. Так, в 2015 г. на контроле в слое 0–20 см величина рН солевой вытяжки, определенная в насыщенной водой почвенной пасте, составляла 4,9, а в стандартной вытяжке – 5,63. При этом по величине рН солевой вытяжки при стандартном соотношении почва : раствор = 1 : 2,5 почва оценивалась как близкая к нейтральной, а при соотношении почва : раствор = 1 : 0,5 – как сильнокислая.

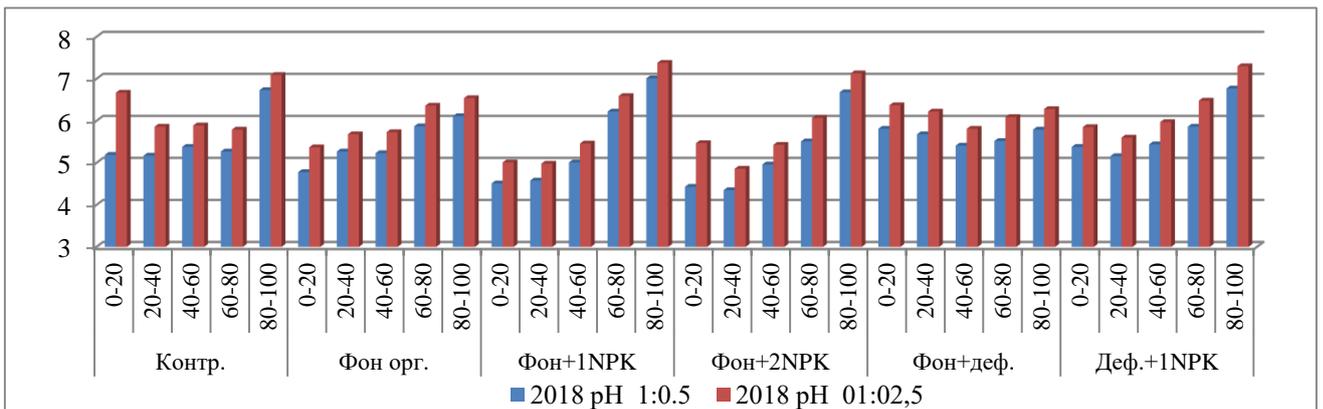
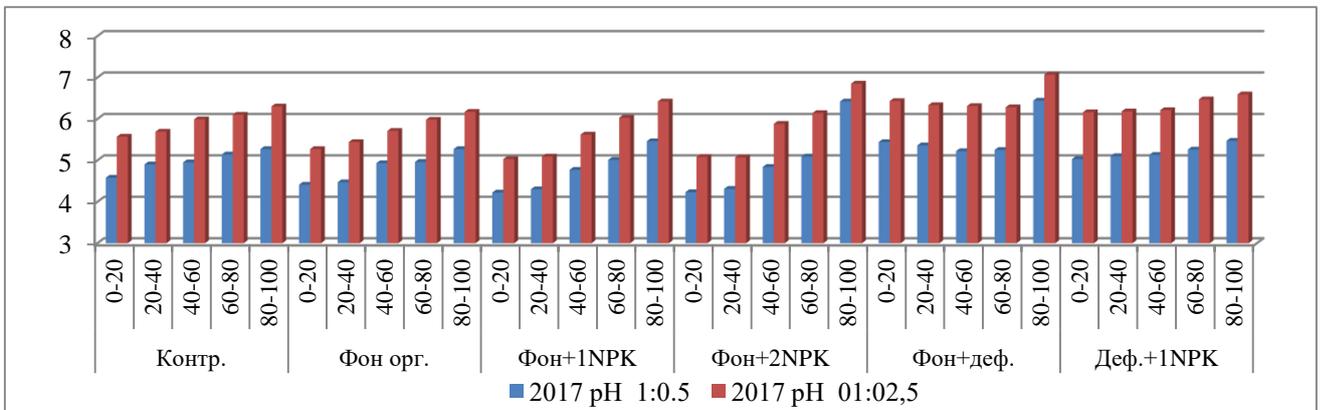
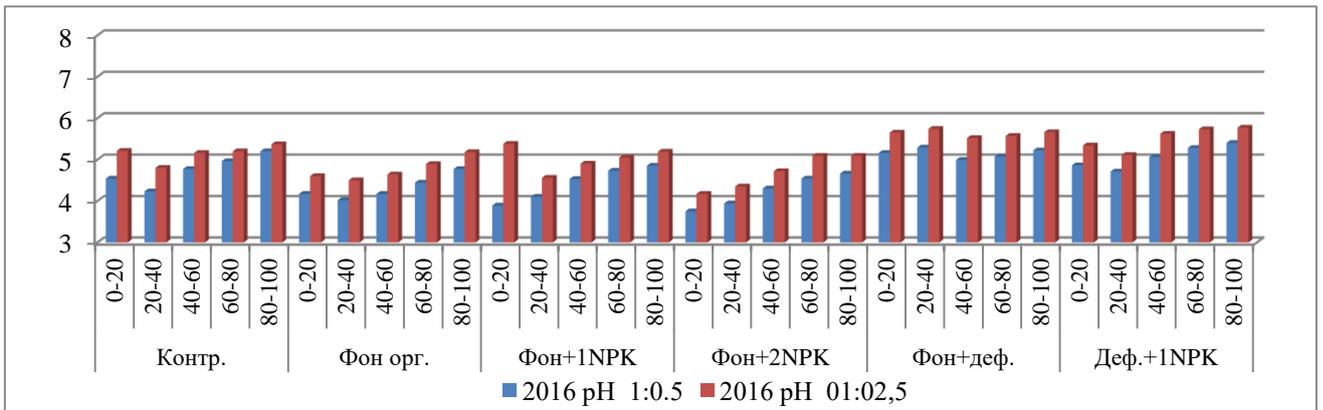
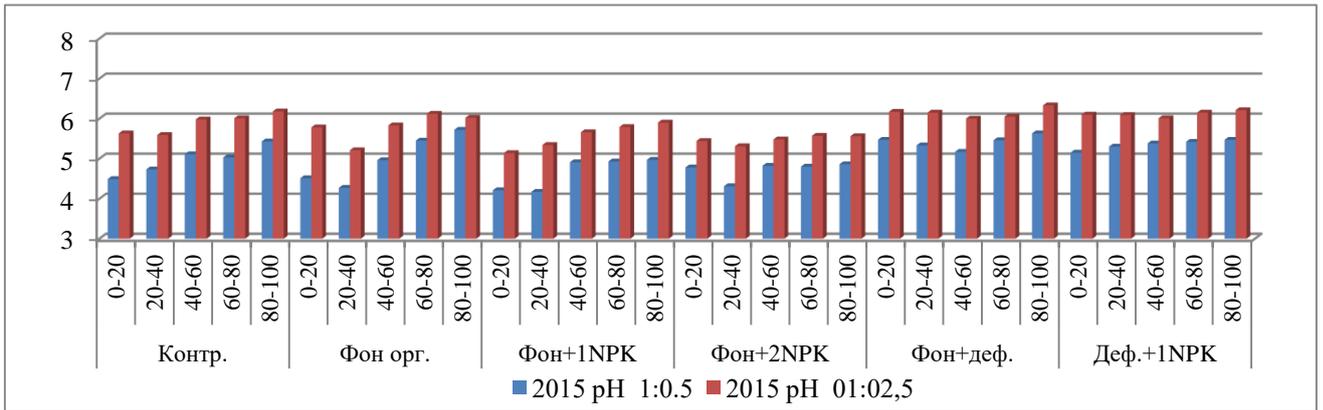
Какая из этих величин ближе к реальной оценке обменной кислотности? При стандартном соотношении получается суспензия, в пересчете на влажность

почвы это 250%, а в насыщенной водой почвенной пасте 50%. Такая влажность может наблюдаться в период весеннего снеготаяния или при летних ливнях. Считаем, что использование насыщенных почвенных паст для оценки как актуальной, так и обменной кислотности более предпочтительно, по сравнению со стандартными суспензиями, дающими существенно завышенные результаты.

Таблица 9 – Влияние разбавления на величину рН солевой вытяжки

Варианты опыта	Слой, см	Годы											
		2015		2016		2017		2018		2019		2020	
		рН 1:0,5	рН 1:2,5										
Контроль	0–20	4,49	5,63	4,54	5,21	4,58	5,57	5,19	6,67	4,63	5,24	5,03	5,85
	20–40	4,73	5,59	4,23	4,80	4,90	5,69	5,17	5,86	5,07	5,63	4,87	5,43
	40–60	5,11	5,98	4,77	5,16	4,95	5,99	5,38	5,89	6,32	6,75	4,98	5,64
	60–80	5,03	6,01	4,96	5,20	5,14	6,10	5,27	5,79	6,78	7,17	5,22	5,75
	80–100	5,43	6,18	5,20	5,37	5,27	6,30	6,73	7,09	6,93	7,28	5,61	6,07
Фон органический	0–20	4,51	5,78	4,17	4,60	4,41	5,27	4,78	5,37	4,64	5,75	4,70	5,18
	20–40	4,27	5,21	4,02	4,50	4,47	5,44	5,27	5,68	4,97	5,43	4,72	5,21
	40–60	4,96	5,83	4,17	4,64	4,93	5,71	5,23	5,73	5,39	5,84	4,61	5,08
	60–80	5,45	6,12	4,44	4,89	4,96	5,98	5,87	6,36	6,60	7,05	5,02	5,46
	80–100	5,72	6,02	4,77	5,18	5,27	6,17	6,11	6,54	6,58	7,29	5,26	5,78
Фон + НРК60	0–20	4,21	5,14	3,89	5,38	4,22	5,03	4,51	5,01	4,80	5,98	4,46	4,91
	20–40	4,17	5,34	4,10	4,56	4,30	5,09	4,58	4,98	5,09	5,88	4,64	5,08
	40–60	4,91	5,66	4,53	4,90	4,77	5,62	5,01	5,46	5,28	5,873	4,91	5,38
	60–80	4,93	5,79	4,73	5,05	5,01	6,03	6,22	6,59	5,73	6,18	5,17	5,58
	80–100	4,97	5,90	4,85	5,19	5,46	6,42	7,01	7,38	6,82	7,16	5,28	5,83
Фон + НРК120	0–20	4,78	5,44	3,75	4,17	4,23	5,08	4,43	5,47	4,60	5,33	4,26	4,68
	20–40	4,31	5,31	3,94	4,35	4,31	5,07	4,35	4,86	4,78	5,36	4,59	4,99
	40–60	4,82	5,48	4,30	4,72	4,84	5,88	4,96	5,43	5,29	5,92	4,93	5,34
	60–80	4,80	5,57	4,54	5,09	5,09	6,14	5,51	6,07	6,24	6,78	4,82	5,21
	80–100	4,86	5,56	4,66	5,09	6,42	6,85	6,68	7,13	6,79	7,21	4,91	5,30
Фон + дефекаг	0–20	5,47	6,17	5,16	5,65	5,44	6,43	5,81	6,37	5,36	6,87	5,38	5,89
	20–40	5,33	6,15	5,29	5,74	5,36	6,33	5,68	6,22	5,24	6,41	5,53	5,98
	40–60	5,17	6,00	4,99	5,52	5,22	6,31	5,41	5,81	5,10	5,90	5,57	6,08
	60–80	5,46	6,05	5,07	5,57	5,25	6,28	5,52	6,09	5,14	6,17	5,52	5,97
	80–100	5,63	6,33	5,22	5,66	6,44	7,07	5,79	6,28	6,82	7,19	6,60	6,92
Дефекаг + НРК60	0–20	5,15	6,10	4,86	5,34	5,03	6,16	5,38	5,85	4,81	6,03	5,21	5,92
	20–40	5,30	6,09	4,71	5,11	5,10	6,18	5,16	5,60	5,13	5,76	5,27	5,83
	40–60	5,38	6,01	5,06	5,62	5,13	6,21	5,44	5,97	5,34	5,87	5,31	5,87
	60–80	5,42	6,15	5,28	5,73	5,26	6,47	5,86	6,48	5,47	5,98	5,54	6,05
	80–100	5,47	6,21	5,40	5,77	5,47	6,59	6,77	7,30	5,59	6,12	6,73	7,07

Наиболее наглядно эти различия представлены на рисунке 12.



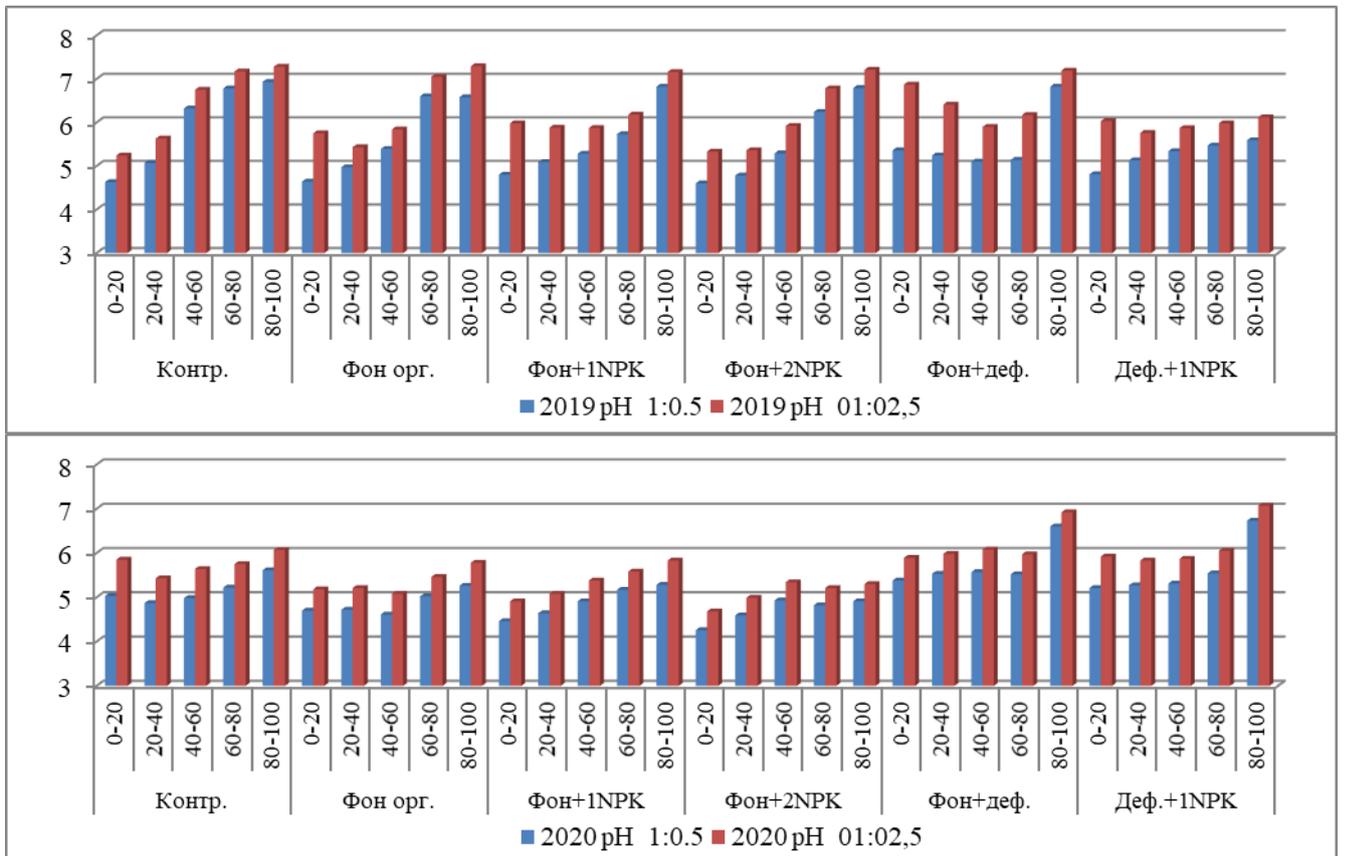


Рисунок 12 – Влияние степени разбавления на величину рН солевой вытяжки

Обращает на себя внимание не только существенные различия в величинах рН солевой вытяжки, определенной в насыщенных почвенных пастах и в стандартной солевой вытяжке, но и сам характер этих изменений, как по вариантам опыта, так и по профилю изучаемой почвы. Представляет интерес и характер изменения этой величины по профилю изучаемой почвы. Каковы же особенности изменения величины рН солевой вытяжки по профилю? Их, по крайней мере, две. Первая – на всех вариантах опыта мы наблюдаем резкую дифференциацию профиля изучаемой почвы по величине рН солевой вытяжки, кроме вариантов с дефектом, где она минимальная. Вторая – на контроле и удобренных вариантах наблюдается наиболее низкая величина рН солевой вытяжки, начиная с пахотного слоя и на всю мощность гумусового горизонта.

Иначе говоря, мы наблюдаем явно выраженное подкисление, обусловленное применением органических и минеральных удобрений на удобренных вариантах и на контроле, и это следствие потерь кальция. Потери кальция есть, разумеется, и на удобренных вариантах, просто масштаб потерь здесь выше. Это процесс де-

кальцирования, что в свое время в условиях стационара было доказано исследованиями К.Е. Стекольникова [143]. На вариантах с дефекатом этот процесс компенсирован и стабилизирован. В таблице 10 представлены данные определения величины рН водной и солевой вытяжек в насыщенных водой почвенных пастах (соотношение почва : раствор = 1 : 0,5).

Таблица 10 – Изменение величины рН водной и солевой вытяжек в почвенных пастах

Варианты опыта	Слой, см	Годы											
		2015		2016		2017		2018		2019		2020	
		рН _{водн}	рН _{сол}										
Контроль	0–20	5,44	4,49	5,37	4,54	5,72	4,58	5,93	5,19	5,80	4,63	6,21	5,03
	20–40	5,62	4,73	4,97	4,23	5,59	4,90	6,05	5,17	6,03	5,07	5,98	4,87
	40–60	6,03	5,11	5,55	4,77	5,71	4,95	6,14	5,38	6,98	6,32	6,29	4,98
	60–80	5,90	5,03	5,98	4,96	5,89	5,14	6,23	5,27	7,30	6,78	6,38	5,22
	80–100	6,20	5,43	6,08	5,20	6,05	5,27	7,30	6,73	7,58	6,93	6,75	5,61
Фон органический.	0–20	5,45	4,51	5,26	4,17	5,13	4,41	5,63	4,78	5,91	4,64	5,80	4,70
	20–40	4,65	4,27	5,00	4,02	5,21	4,47	5,94	5,27	5,99	4,97	5,75	4,72
	40–60	6,00	4,96	5,18	4,17	5,66	4,93	6,13	5,23	6,38	5,39	5,66	4,61
	60–80	6,30	5,45	5,65	4,44	5,94	4,96	6,73	5,87	7,21	6,60	6,28	5,02
	80–100	6,14	5,72	5,97	4,77	6,26	5,27	6,91	6,11	7,33	6,58	6,26	5,26
Фон + НРК60	0–20	4,99	4,21	4,89	3,89	5,14	4,22	5,36	4,51	6,08	4,80	5,53	4,46
	20–40	4,98	4,17	5,08	4,10	5,19	4,30	5,44	4,58	5,99	5,09	5,74	4,64
	40–60	5,78	4,91	5,77	4,53	5,72	4,77	5,93	5,01	6,27	5,28	6,15	4,91
	60–80	5,49	4,93	5,97	4,73	5,98	5,01	6,97	6,22	6,56	5,73	6,30	5,17
	80–100	5,82	4,97	6,11	4,85	6,32	5,46	7,59	7,01	7,63	6,82	6,37	5,28
Фон + НРК120	0–20	5,32	4,78	4,92	3,75	5,08	4,23	5,31	4,43	5,50	4,60	5,38	4,26
	20–40	5,02	4,31	5,05	3,94	5,12	4,31	5,17	4,35	5,86	4,78	5,58	4,59
	40–60	5,07	4,82	5,36	4,30	5,72	4,84	5,84	4,96	6,37	5,29	5,87	4,93
	60–80	5,54	4,80	5,56	4,54	6,09	5,09	6,17	5,51	7,07	6,24	6,10	4,82
	80–100	5,39	4,86	6,15	4,66	7,18	6,42	7,29	6,68	7,53	6,79	6,16	4,91
Фон + дефекат	0–20	6,62	5,47	6,29	5,16	6,40	5,44	6,62	5,81	6,44	5,36	6,40	5,38
	20–40	6,70	5,33	6,21	5,29	6,35	5,36	6,48	5,68	6,49	5,24	6,54	5,53
	40–60	6,19	5,17	6,10	4,99	6,17	5,22	6,37	5,41	6,04	5,10	6,73	5,57
	60–80	6,43	5,46	6,31	5,07	6,23	5,25	6,49	5,52	6,43	5,14	6,78	5,52
	80–100	6,71	5,63	6,55	5,22	7,20	6,44	6,85	5,79	7,69	6,82	7,37	6,60
Дефекат + НРК60	0–20	6,47	5,15	5,97	4,86	5,96	5,03	6,27	5,38	5,89	4,81	6,19	5,21
	20–40	6,01	5,30	5,76	4,71	6,20	5,10	6,01	5,16	6,13	5,13	6,15	5,27
	40–60	5,91	5,38	6,21	5,06	6,22	5,13	6,36	5,44	6,40	5,34	6,42	5,31
	60–80	6,40	5,42	6,34	5,28	6,25	5,26	6,87	5,86	6,58	5,47	6,79	5,54
	80–100	6,76	5,47	6,46	5,40	6,76	5,47	7,41	6,77	6,70	5,59	7,50	6,73

Считаем, что соотношение 1 : 0,5 наиболее близко к уровню естественного увлажнения почвы, т.е. равному 50%. Подобное состояние почвы может наблюдаться после снеготаяния или при выпадении ливневых осадков, так характерных для условий изучаемой лесостепной зоны. При стандартном соотношении 1 : 2,5 получается суспензия 250% влажности. Это приводит к весьма существенному разбавлению почвенного раствора и снижению его концентрации. Представляет интерес сравнение величин активной и обменной кислотности, определенных в насыщенных почвенных пастах.

Изменение таких важных показателей физико-химического состояния почвы как величина рН водной и солевой вытяжек под влиянием систем применения удобрения и дефеката за исследуемый период представлено на рисунке 13. Судя по данным рисунка 13, величина рН водной и солевой вытяжек очень изменчива как по вариантам опыта, так и по годам наблюдений. Однако отчетливо просматривается несколько закономерностей.

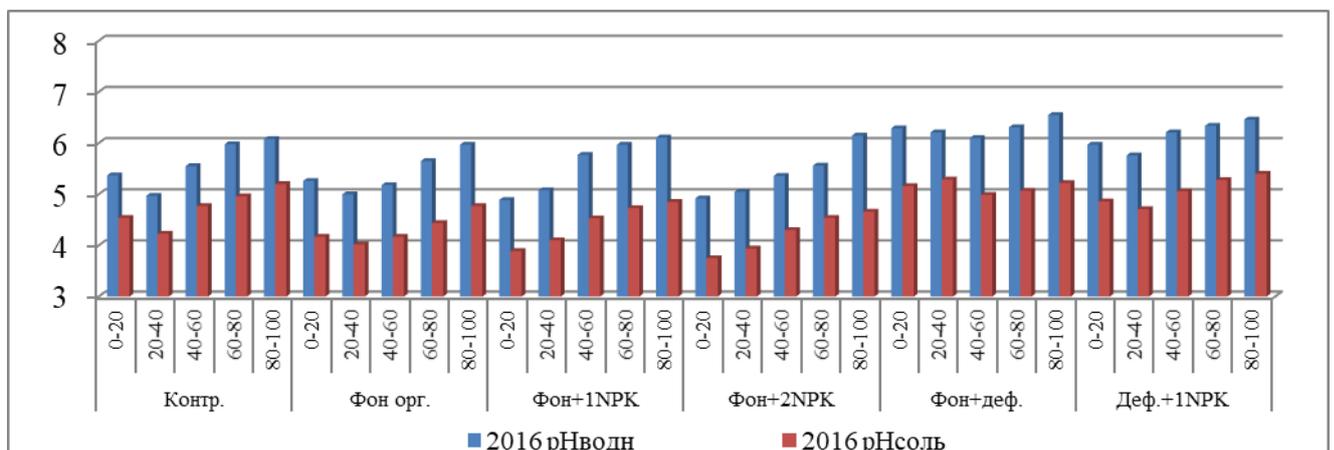
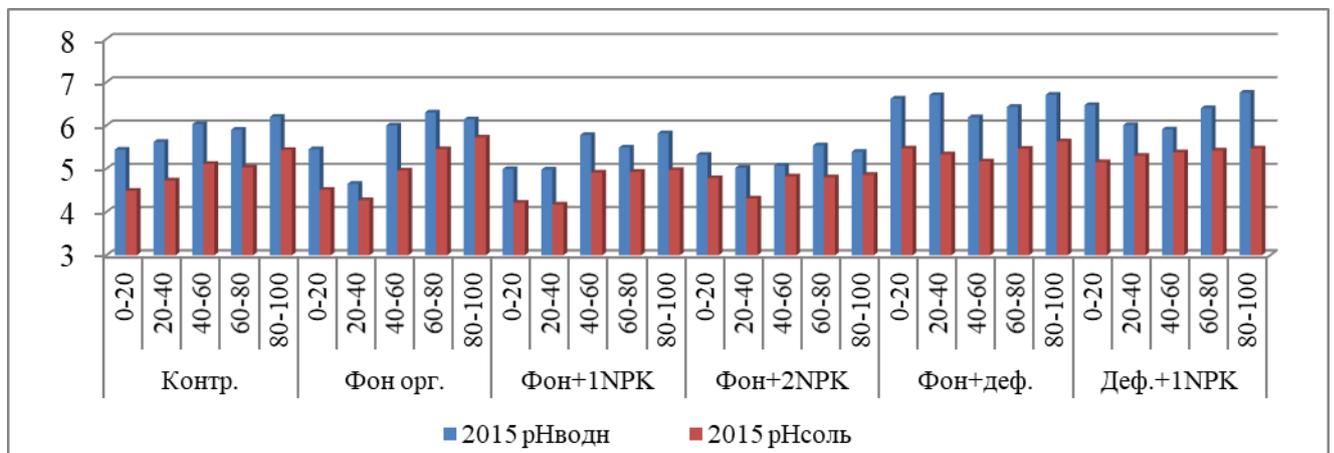




Рисунок 13 – Величина рН водной и солевой вытяжек в насыщенных почвенных пастах

Первая – величина рН минимальна в слое 0–20 см, а по профилю она возрастает. Это обусловлено повышением содержания свободного кальция в нижней части профиля, на что указывает величина рН водной вытяжки выше 7,3 в слое 80–100 см, т.е. наблюдается вскипание.

Вторая – внесение органических и минеральных удобрений существенно снижает величины рН водной и солевой вытяжек в слое 0–40 см. На вариантах с дефекатом рН этих вытяжек по всему профилю на 0,5–1,3 единицы выше, чем на неудобранных вариантах и контроле.

Третья – величины рН водной и солевой вытяжек на варианте с дефекатом совместно с одинарной дозой минеральных удобрений ниже, чем на варианте с дефекатом по органическому фону.

Таким образом, даже в последствии, дефекат уменьшает подкисление изучаемой почвы и стабилизирует актуальную и обменную кислотность в оптимальном диапазоне. Подобные закономерности наблюдаются и по величине гидролитической кислотности (Таблица 11).

Так, на контроле в пахотном слое за время наблюдений гидролитическая кислотность варьировала в пределах 1,23–3,33 мг-экв/100 г почвы, а на варианте органической системы применения удобрения – 1,90–4,23 мг-экв/100 г почвы, и по существующей градации (Таблица 5) оценивалась как нейтральная и среднекислая. Различия существенны.

На вариантах органоминеральной системы удобрения с одинарной и двойной дозами минеральных удобрений гидролитическая кислотность находилась в диапазоне 1,94–4,82 и 3,19–5,85 мг-экв/100 г почвы и оценивалась как нейтральная и сильно кислая соответственно.

Варианты с дефекатом не только имели более низкую величину гидролитической кислотности по сравнению с остальными вариантами опыта, но ее значения находились в более узком диапазоне – 0,91–1,86 и 1,46–2,46 мг-экв/100 г почвы соответственно. На варианте с дефекатом по органическому фону кислотность была нейтральной и нейтральной или слабокислой для варианта с дефекатом совместно с одинарной дозой минеральных удобрений [12, 144].

Таблица 11 – Изменение гидролитической кислотности под влиянием удобрений и дефеката, мг-экв/100 г почвы

Варианты опыта	Слой, см	Годы					
		2015	2016	2017	2018	2019	2020
Контроль	0–20	2,11	2,80	1,23	1,94	3,33	2,07
	20–40	3,13	3,25	1,25	2,07	2,07	2,21
	40–60	1,78	1,56	0,83	1,43	0,85	0,97
	60–80	0,87	1,31	0,70	1,28	0,31	1,23
	80–100	0,64	0,87	0,48	0,42	0,26	1,08
Фон органический, 40 т/га навоза	0–20	3,79	4,23	1,90	2,92	2,57	2,57
	20–40	4,61	4,42	1,43	2,16	1,78	3,56
	40–60	3,96	4,05	0,97	1,43	1,28	3,13
	60–80	1,56	2,21	0,73	0,73	0,63	1,67
	80–100	0,87	1,43	0,48	0,81	0,52	1,06
Фон + N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀	0–20	4,82	4,82	1,94	3,48	2,57	4,05
	20–40	3,71	3,82	2,92	3,33	1,74	3,05
	40–60	1,34	1,50	1,78	1,56	1,31	2,02
	60–80	1,13	1,43	1,28	0,76	0,87	1,34
	80–100	0,83	1,25	0,75	0,29	0,36	1,03
Фон + N ₁₂₀ P ₁₂₀ K ₁₂₀	0–20	5,85	5,14	3,40	3,19	3,63	4,61
	20–40	4,71	4,61	3,25	3,13	2,16	3,82
	40–60	2,62	2,92	1,67	1,89	1,28	2,31
	60–80	1,67	2,07	1,15	1,05	0,70	1,94
	80–100	1,25	1,43	0,48	0,39	0,35	1,78
Фон + дефекат	0–20	1,03	1,46	1,23	0,91	1,40	1,86
	20–40	0,99	1,46	1,18	0,97	1,67	1,40
	40–60	1,13	1,70	1,31	1,08	2,11	1,20
	60–80	0,81	1,13	1,13	0,87	1,43	1,15
	80–100	0,48	0,75	0,85	0,67	0,31	0,56
Дефекат + N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀	0–20	1,74	2,07	1,67	1,46	2,46	2,25
	20–40	2,25	2,35	1,43	1,82	2,02	2,07
	40–60	0,99	1,34	1,20	1,40	1,37	1,50
	60–80	0,78	1,26	1,05	0,87	1,18	1,18
	80–100	0,61	1,01	0,29	0,28	0,91	0,47
НСР ₀₅		0,79					

Как следует из данных таблицы 11, пороговой величиной кислотности почв по гидролитической кислотности является 2,1–3,0 мг-экв/100 г почвы. На контроле эта величина была превышена только в 2019 г. (3,33 мг-экв/100 г почвы). На варианте органической системы удобрения эта величина была превышена в 2015 и 2016 гг. – 3,79 и 4,23 мг-экв/100 г почвы соответственно. На варианте органо-

минеральной системы удобрения с одинарной дозой минеральных удобрений в 2017 и 2019 гг. гидролитическая кислотность была ниже порогового значения, а на варианте с двойной дозой минеральных удобрений – устойчиво выше. На вариантах с дефекатом гидролитическая кислотность была устойчиво низкой [12, 142].

Как следует из полученных нами данных, величина гидролитической кислотности весьма динамична во времени и по профилю изучаемой почвы. Общей закономерностью является существенный рост величины гидролитической кислотности на вариантах с органическими и особенно с минеральными удобрениями по органическому фону. Максимальная ее величина наблюдается в пахотном слое, с глубиной она прогрессивно уменьшается. Это обусловлено появлением миграционных форм карбонатов, нейтрализующих кислотность.

Минимальная величина гидролитической кислотности наблюдалась на варианте с дефекатом по органическому фону. На варианте с дефекатом совместно с одинарной дозой минеральных удобрений она была несколько выше, но по сравнению с остальными вариантами ниже. Таким образом, органическая и органоминеральная системы удобрения способствуют повышению величины гидролитической кислотности. Последствие дефеката существенно и устойчиво понижают величину гидролитической кислотности и поддерживают ее на оптимальном уровне – меньше 3 мг-экв/100 г почвы, что наглядно представлено на рисунке 14.

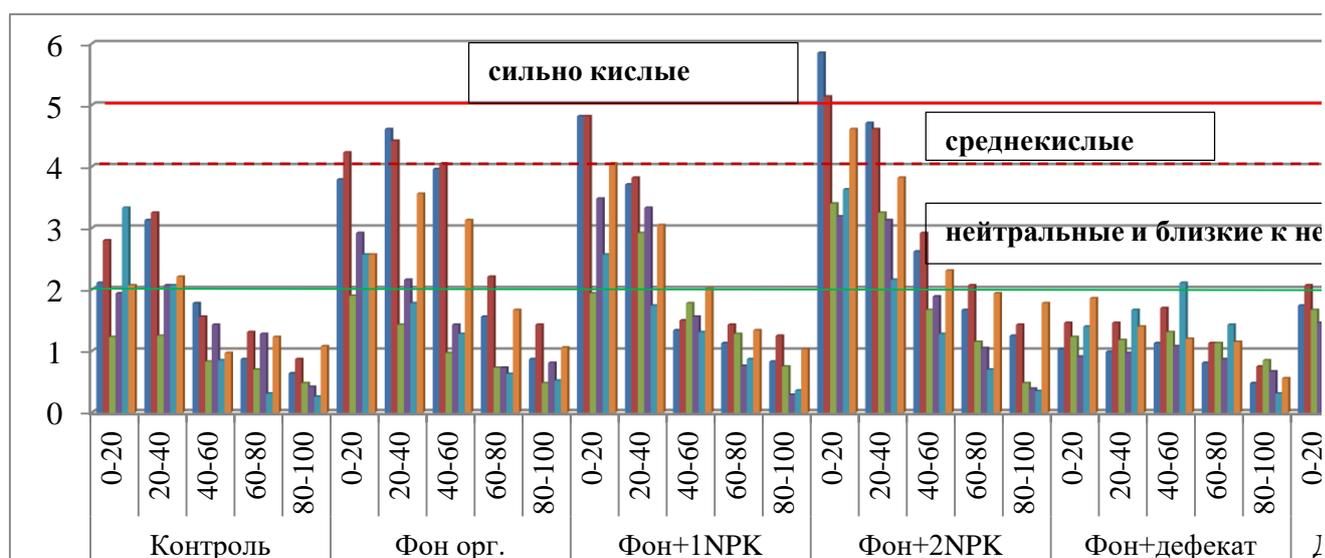


Рисунок 14 – Влияние систем удобрения и дефеката на величину гидролитической кислотности, мг-экв/100 г почвы

Как следует из данных таблицы 11 и рисунка 15, на контроле в пахотном слое в 2015, 2016 и 2019 гг. величина гидролитической кислотности варьировала в пределах диапазона от близкой к нейтральной до слабокислой. Внесение в 2016 г. навоза повысило гидролитическую кислотность до среднекислой. На органоминеральной системе удобрения гидролитическая кислотность повышалась до среднекислой и сильнокислой, и только на вариантах с дефекатом по всем годам наблюдений она находилась в нейтральном диапазоне.

Сумма обменных оснований считается одним из стабильных показателей физико-химического состояния почв. Ее величина обусловлена содержанием органических, минеральных и органоминеральных коллоидов. Она существенным образом зависит от реакции среды. Подкисление ведет к снижению, а подщелачивание к заметному повышению суммы обменных оснований. Нами уже выявлено, что все показатели кислотности изучаемой почвы динамичны во времени и пространстве. Наши исследования выявили высокую изменчивость суммы обменных оснований, как во времени, так и по профилю изучаемой почвы. Дополнительно рассчитана и степень насыщенности почвы основаниями. Данные приведены в таблице 12 и на рисунке 15.

Анализ данных таблицы 12 показывает, что системы удобрения несущественно снижают сумму обменных оснований по всем годам наблюдений, а последствие дефеката не только компенсирует этот процесс, но и поддерживает выше уровня, наблюдаемого на варианте без удобрений. Следует отметить, что минимальная сумма обменных оснований на всех вариантах опыта наблюдалась в 2017 г. в паровом поле. Считаем, что это следствие преобладания процесса минерализации над гумификацией растительных остатков, обусловившее снижение органических и органоминеральных коллоидов.

Отметим, что зачастую практически на всех вариантах опыта отмечается снижение суммы обменных оснований в слое 0–20 см, что связано с явлением так называемого выпаживания [150]. В данной работе показаны последствия интенсивного земледелия без сопутствующего известкования.

Таблица 12 – Изменение величины суммы обменных оснований и степени насыщенности основаниями под влиянием систем удобрения и дефеката

Варианты опыта	Слой, см	Годы, культуры севооборота											
		2015 ячмень	2016 оз. пш.	2017 пар	2018 оз. пш.	2019 сах. св.	2020 в-овес	2015 ячмень	2016 оз. пш.	2017 пар	2018 оз. пш.	2019 сах. св.	2020 в-овес
Контроль	0–20	19,75	21,12	19,62	18,27	19,27	19,62	95	88	92	90	85	90
	20–40	18,75	16,37	20,00	19,97	21,55	20,07	86	83	92	91	91	90
	40–60	17,25	24,77	20,12	17,45	21,72	20,30	91	94	95	92	96	91
	60–80	18,00	22,05	19,02	18,70	21,80	14,80	95	94	95	93	98	92
	80–100	18,50	23,07	18,02	16,82	21,27	17,95	97	96	96	97	99	94
Фон органический	0–20	17,25	22,50	19,90	17,97	19,40	19,90	82	84	89	86	88	88
	20–40	16,00	23,15	19,20	20,50	22,77	17,00	78	84	91	90	93	83
	40–60	17,00	24,60	20,22	19,12	21,00	21,05	81	86	94	93	94	81
	60–80	16,50	24,80	19,50	18,95	21,72	19,80	91	92	95	96	97	92
	80–100	19,75	23,10	18,70	18,22	21,15	18,00	96	94	95	96	98	94
Фон + НРК60	0–20	18,50	16,75	19,00	17,40	19,52	19,82	79	78	88	83	88	83
	20–40	17,00	24,20	19,15	20,20	21,17	20,50	82	86	83	86	92	87
	40–60	18,50	24,50	20,00	19,77	20,92	19,77	93	94	89	93	94	91
	60–80	16,50	24,00	19,32	17,80	18,87	15,57	94	94	92	96	96	92
	80–100	16,25	22,40	18,22	15,85	18,80	17,72	95	95	95	99	98	94
Фон + НРК120	0–20	19,25	19,45	18,65	18,55	19,57	19,10	77	79	80	85	88	80
	20–40	17,00	23,15	19,97	17,27	22,35	17,25	78	83	82	85	92	82
	40–60	16,00	25,00	19,57	21,72	19,75	19,77	86	89	90	92	94	89
	60–80	15,25	23,20	19,05	16,20	21,65	19,32	90	92	92	94	97	91
	80–100	17,00	23,70	18,12	16,15	18,35	17,50	93	94	96	98	98	91
Фон + дефекаг	0–20	20,25	24,55	20,82	18,30	21,90	21,92	95	94	93	95	94	92
	20–40	19,75	25,82	21,22	19,70	21,55	21,17	95	94	93	95	93	94
	40–60	19,50	25,75	19,57	20,10	23,77	19,32	94	94	92	95	92	94
	60–80	19,25	23,75	19,72	18,50	20,25	19,25	96	95	93	95	93	94
	80–100	19,00	19,80	21,64	16,95	20,17	20,70	97	96	95	96	98	97
Дефекаг + НРК60	0–20	16,25	22,80	20,47	19,87	21,55	18,75	90	92	90	93	90	89
	20–40	15,50	23,32	20,52	20,52	20,65	21,00	87	91	92	92	92	91
	40–60	20,50	23,92	21,20	19,67	21,60	22,00	95	95	93	93	94	94
	60–80	17,75	24,07	20,85	19,22	20,80	20,77	96	95	94	96	95	95
	80–100	16,00	23,70	19,50	18,90	20,82	19,80	96	96	94	94	96	98
НСР ₀₅		2,74						3,39					

Характер изменения суммы обменных оснований по профилю соответствует преимущественно элювиально-иллювиальному типу. Внесение удобрений усиливает степень дифференциации профиля по этому показателю особенно на вариантах органоминеральной системы удобрения. Это наглядно представлено на рисунке 15.

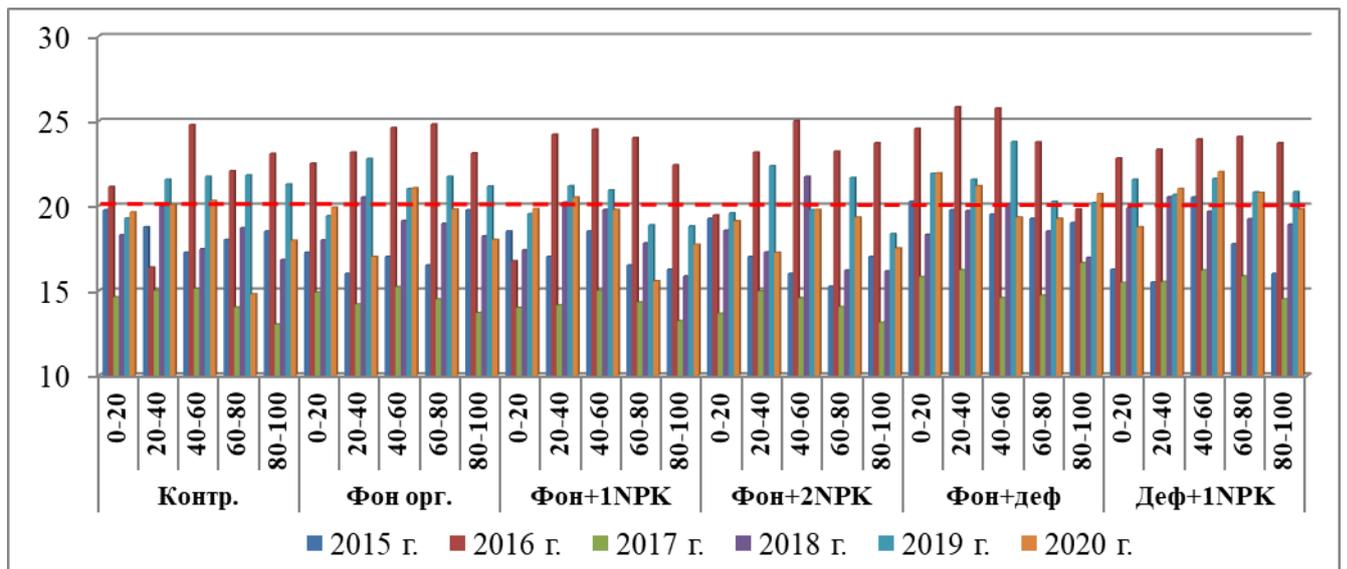


Рисунок 15 – Изменение суммы обменных оснований под влиянием систем удобрения и дефеката, мг-экв/100 г почвы

Красной пунктирной линией отмечен уровень 20 мг-экв/100 г почвы, что соответствуем верхней границе повышенного уровня суммы обменных оснований. Это дает возможность оценить изменения этой величины под влиянием систем применения удобрения и дефеката.

До заложения опыта сумма обменных оснований в пахотном слое изучаемой почвы составляла 29,94 мг-экв/100 г почвы, что соответствовало высокому уровню (Таблица 5) и снижалась в нижней части профиля до 24,27 (Таблица 1). За почти 30-летний период отмечается существенное снижение ее величины. Как следует из полученных нами данных, сумма обменных оснований в пахотном слое снижалась до уровня менее 15 мг-экв/100 г почвы (2017 г.), что соответствует среднему уровню величины суммы обменных оснований, за исключением варианта с дефекатом по органическому фону.

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 внесенного в 2005 г. дефеката. За все годы наблюдений на удобренных вариантах сумма обменных оснований в пахотном слое была ниже, чем на вариантах с дефе-

катом. Более 2-х ротаций севооборота мы наблюдаем последствие дефеката и отмечаем явный положительный эффект. Профиль изучаемой почвы на вариантах с дефекатом имеет менее выраженную дифференциацию по сумме обменных оснований.

Степень насыщенности основаниями является комплексным показателем физико-химического состояния почвы. Данные приведены в таблице 12 и на рисунке 16.

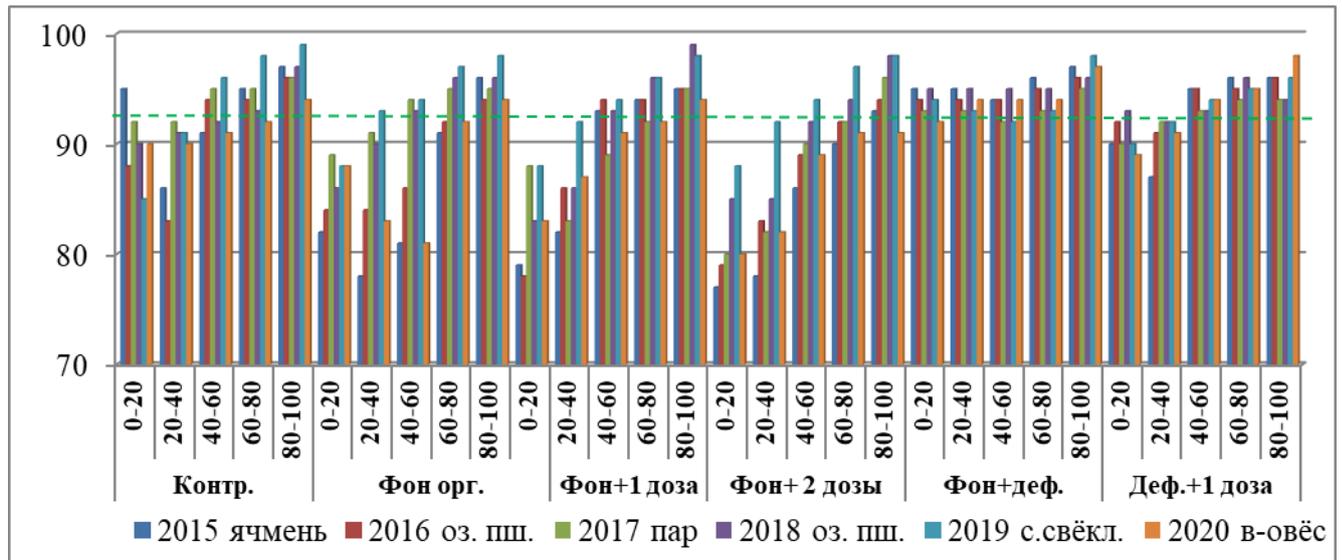


Рисунок 16 – Влияние систем применения удобрения и дефеката на степень насыщенности основаниями, %

Оптимальная величина степени насыщенности основаниями для черноземов является 93% [28], что показано на рисунке 17 зеленой линией. Как и все показатели физико-химического состояния почв, степень насыщенности основаниями подвержена существенным колебаниям во времени и пространстве. Однако анализ данных рисунка 17 показывает, что внесение удобрений оказывает существенное влияние на степень насыщенности основаниями. Если на удобренном варианте она в пахотном слое в среднем за 6 лет находилась на уровне 90%, с колебаниями в пределах 85–95%, то на удобренных вариантах она снижается и варьирует в пределах 82–89, 79–88, 77–88%, соответственно по органическому фону, с одинарной и двойной дозами минеральных удобрений по органическому фону. Средняя величина степени насыщенности основаниями на удобренных вариантах составляет 86, 83 и 81% соответственно. На варианте с дефекатом по орга-

ническому фону степень насыщенности основаниями в среднем составляла 94% при колебаниях в пределах 93–95%, а на варианте дефеката с одинарной дозой минеральных удобрений – 91% и 89–93%. Вывод получается следующий: только этот вариант не требует известкования.

Установлено, что амплитуда колебаний степени насыщенности основаниями на контроле составляет 5%, а на вариантах органического фона, с одинарной и двойной дозами минеральных удобрений по органическому фону 6, 9 и 11% соответственно. Минимальная амплитуда колебаний этого показателя наблюдается на варианте с дефекатом по органическому фону – 2%, а на варианте с дефекатом совместно с одинарной дозой минеральных удобрений – 4%, что заметно ниже, чем на остальных вариантах опыта [143].

На все почвенные режимы существенное влияние оказывают гидротермические условия периода наблюдений (см. Таблицу 11). Как следует из приведенных в таблице 11 данных, за наблюдаемый период отмечаются существенные колебания гидротермических условий. Сумма осадков, выпадавших крайне неравномерно за вегетационный период, колебалась в пределах 178–255 мм, а сумма активных температур – от 2720 до 3025°C. По всем годам наблюдений активный вегетационный период характеризовался дефицитом увлажнения, что подтверждается величиной ГТК – 0,62–0,90. За исключением 2017 г. ГТК = 1,0, осень была крайне засушливой, ГТК = 0,04–0,082. Это способствовало формированию устойчивого испарения почвенной влаги и подъему миграционных форм карбонатов в отдельные годы до нижней границы гумусового горизонта, что подтверждается полученными нами данными (см. Рисунки 6-8). Также это подтверждается визуальным появлением мицеллярных форм карбонатов в нижней части профиля в 2017–2020 гг. Емкость катионного обмена является одним из относительно стабильных показателей физико-химических показателей почвы. Как мы уже отмечали, и этот показатель является относительно стабильным, ведь очень изменчива величина гидролитической кислотности. Это действительно так, если учитывать, что мы использовали расчетный метод определения емкости катионного обмена (ЕКО) по сумме обменных оснований и гидролитической кислотности. Данные представлены в таблице 13.

Таблица 13 – Влияние системы удобрения и дефеката на емкость катионного обмена, мг-экв/100 г почвы

Варианты опыта	Слой, см	Годы					
		2015	2016	2017	2018	2019	2020
Контроль	0–20	21,86	23,92	20,85	20,21	22,60	21,69
	20–40	21,88	19,62	21,25	22,04	23,62	22,28
	40–60	19,03	26,53	20,95	18,88	22,57	21,27
	60–80	18,87	23,26	19,72	19,98	22,11	16,03
	80–100	19,14	23,94	18,50	17,24	21,53	19,03
Фон органический	0–20	21,04	26,73	21,80	20,89	21,97	22,47
	20–40	20,61	27,57	20,63	22,66	24,55	20,56
	40–60	20,96	28,65	21,19	20,55	22,28	24,18
	60–80	18,06	27,01	20,23	19,88	22,35	21,47
	80–100	20,63	24,53	19,18	19,03	21,67	19,06
Фон + NPK60	0–20	23,32	21,57	20,94	20,88	22,09	23,87
	20–40	20,71	28,02	22,07	22,53	22,91	23,55
	40–60	19,84	26,00	21,78	21,33	21,22	21,79
	60–80	17,63	25,43	20,60	18,56	19,74	16,91
	80–100	17,08	23,65	18,97	16,14	19,16	18,75
Фон + NPK120	0–20	25,10	24,59	22,05	21,74	23,20	23,71
	20–40	21,71	27,76	23,22	20,40	24,51	21,07
	40–60	18,62	27,92	21,24	23,61	20,03	22,08
	60–80	16,93	25,27	20,20	17,25	22,35	21,26
	80–100	18,25	24,13	18,60	16,54	18,70	19,28
Фон + дефекат	0–20	21,28	26,01	22,05	19,21	23,30	23,76
	20–40	20,74	27,28	22,40	20,67	23,22	22,57
	40–60	20,63	27,45	20,88	21,18	25,88	20,52
	60–80	20,04	24,88	20,85	19,37	21,68	20,40
	80–100	19,48	20,55	22,49	17,62	20,48	21,26
Дефекат + NPK60	0–20	17,99	24,87	22,14	21,33	24,01	21,00
	20–40	17,75	25,67	21,95	22,34	22,67	23,07
	40–60	21,49	25,26	22,40	21,07	22,97	23,50
	60–80	15,53	25,33	21,90	20,07	21,98	21,95
	80–100	16,61	24,71	19,79	19,18	21,73	20,27

Насколько актуален обсуждаемый вопрос? Поглощительная способность играет важную роль в процессах профильной дифференциации разнообразных органических и неорганических веществ. В какой-то мере почвенный профиль представляет собой своеобразную хроматографическую колонку, в которой отдельные генетические горизонты, характеризующиеся своими индивидуальными составом и свойствами, выступают в качестве барьеров для тех или иных соединений, мо-

лекул и ионов, закрепляя одни в ущерб другим. Неоднородность сорбционных процессов по отношению к различным веществам отражается на скорости передвижения их по почвенному профилю. Необходимо отметить, что ЕКО во многом зависит от содержания и состояния коллоидов почвы и вида катионов в поглощающем комплексе [55]. Ведь 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.

Таблица 14 – Группировка почв по емкости катионного обмена
(по А.А. Васильеву, В.П. Дьякову, 1996)

Класс почвы	ЕКО, мг-экв/100 г почвы	Уровень
1	< 5,0	Очень низкая
2	5,1–15,0	Низкая
3	15,1–25,0	Умеренно низкая
4	25,1–35,0	Средняя
5	35,1–45,0	Умеренно высокая
6	> 45,0	Высокая

Если в исходном состоянии ЕКО исследуемой почвы, согласно приведенной в таблице 14 градации, соответствовала среднему уровню, то современное ее состояние соответствует умеренно низкому уровню. С чем же связано столь существенное снижение ЕКО? Как это было установлено К.Е. Стекольниковым [143], 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 контроля и с удобрениями составила 21,85, 22,49, 22,11 и 22,60 мг-экв/100 г почвы соответственно, т.е. применение органической и органоминеральной систем удобрения незначительно повысили ЕКО. Но произошло это за счет повышения гидролитической кислотности и уменьшения суммы обменных оснований (Таблицы 11 и 12), что наглядно иллюстрируют данные рисунка 17.

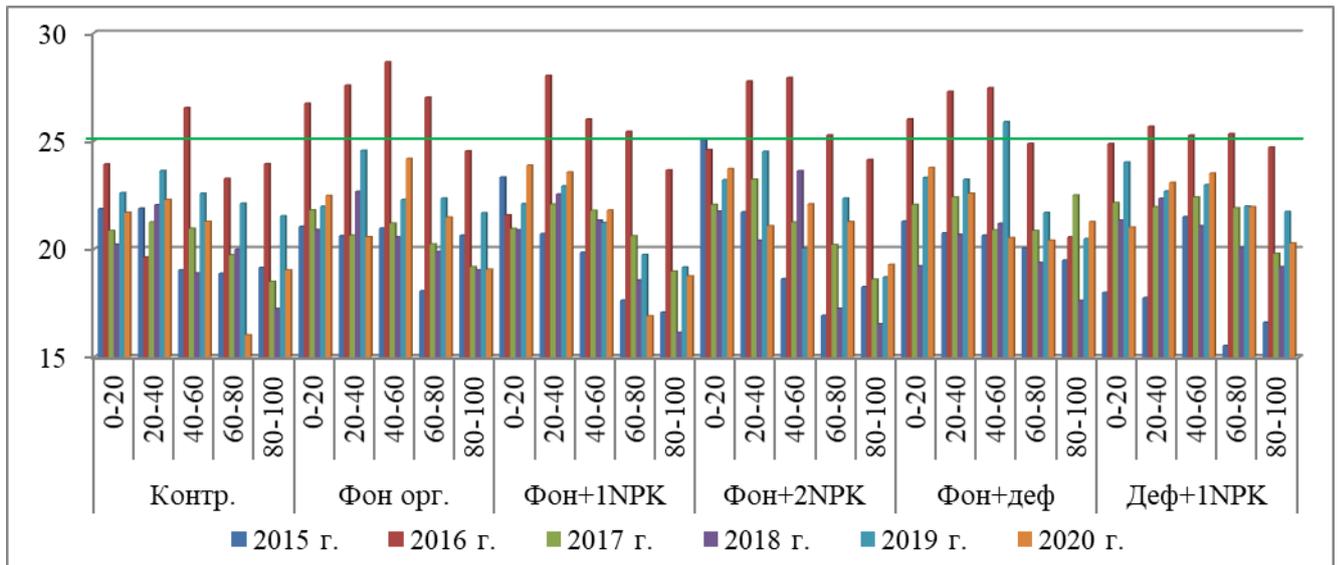


Рисунок 17 – Влияние систем удобрения и дефеката на емкость катионного обмена, мг-экв/100 г почвы

На рисунке 17 зеленой линией показан верхний уровень (25,0 мг-экв/100 г почвы) диапазона умеренно низкой величины ЕКО (Таблица 14). Как следует из данных рисунка 18, уровень ЕКО 25 мг-экв/100 г почвы превышен в 2016 г. в слое 0–20 см только на вариантах органического фона и с дефекатом по органическому фону.

На вариантах с последствием дефеката сумма обменных оснований стабильно выше, чем на остальных вариантах опыта, а гидролитическая кислотность 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, где применялся дефекат по органическому фону, там дефекат имеет остаточное действие или «последствие». Это последствие снижает кислотность почвы, ранее вызванную внесением органических удобрений. Зато на варианте с дефекатом совместно с одинарной дозой минеральных удобрений последствие дефеката не полностью компенсирует подкисляющий эффект минеральных удобрений, поэтому ЕКО на нем чуть выше, чем на варианте с дефекатом по органическому фону за счет снижения суммы обменных оснований и повышения гидролитической кислотности [142, 144].

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.

В качестве общего вывода мы можем сделать заключение о том, что длительное применение органической и органоминеральной системы удобрения обуславливает существенное подкисление изучаемой почвы, а последствие дефеката пока еще его компенсирует.

4 ВЛИЯНИЕ УДОБРЕНИЙ И ДЕФЕКТА НА СОДЕРЖАНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ФОРМ ФОСФОРА

4.1 Фосфор в почвах и его формы

Дефицит фосфора ощущается как в природе, так и в почве, поэтому можно сделать простой вывод, что внесение фосфорных удобрений повышает биологическую продуктивность экосистем. Круговорот фосфора совершается благодаря жизнедеятельности наземных организмов. Значительная часть фосфора переносится грунтовыми водами с суши в водные бассейны и, в конце концов, вновь попадает в Мировой океан. Под действием планктона в Мировом океане происходит круговорот фосфорных соединений. Человек своей хозяйственной деятельностью вносит изменения в этот круговорот. Самая главная причина – это использование людьми минеральных удобрений. Минеральные удобрения – сильное средство воздействия на растения и почву, главное средство воспроизводства почвенного плодородия.

Фосфор представляет собой «дефицитный» элемент. Запасы для изготовления фосфорных удобрений на планете очень малы. Наряду с этим содержание валового фосфора (P_2O_5) в почвах низкое – 0,05–0,25% (от 1 до 5 т/га в пахотном слое 0–20 см). Основной фосфор, который содержится в почве, труднодоступен растениям. Фосфорные удобрения намного сильнее закрепляются в почве в неподвижных формах, нежели калий и тот же азот. Фосфорные соединения в твердых фазах почвы по их доступности для растений делят на пять групп (по Ф.В. Чирикову).

I группа – наиболее доступные растениям, легко переходят в раствор под воздействием угольной кислоты – фосфаты щелочей и NH_4 , одно- и двузамещенные фосфаты Ca и Mg, $Mg_3(PO_4)_2$, часть $Ca_3(PO_4)_2$.

II группа – ближайший резерв фосфора для питания растений – это $Ca_3(PO_4)_2$, часть фосфора фосфорита и апатита, часть $AlPO_4$ и часть органических фосфатов; извлекаются раствором уксусной кислоты.

III группа – в основном представлена труднодоступными фосфатами железа и алюминия, фосфорита, апатита и фитина.

IV группа – это фосфаты органического вещества почвы; непосредственно растениям недоступны.

V группа – фосфаты не выветрившихся минералов; непосредственно растениям недоступны.

Черноземы суглинистого и глинистого гранулометрического состава хорошо обеспечены фосфором [25, 52, 126, 134, 145]. В почвах с повышенным уровнем гумусированности содержание фосфора более высокое, чем в менее гумусированных [21, 84, 98]. В работах многих исследователей [4, 18, 25, 30, 85, 92,] указывается роль минеральных и органических удобрений в аккумуляции фосфора в черноземах и других почвах. При этом еще раньше П.Г. Адерихин [6], А.Ф. Тюлин, Т.А. Маломахова [153] отмечали существенную прямую корреляционную зависимость между содержанием фосфора и содержанием обменных катионов кальция, между валовым содержанием и степенью окультуривания [6, 8, 25, 26, 37, 52, 147, 168].

Давно установлено, что нарушение баланса биогенных элементов в земледелии ведет к уменьшению производства продукции и ухудшению ее качества. К сожалению работающие на земле растениеводы, земледелы и агрохимики имеют дело только с пахотным слоем. Этот слой подвергается наибольшему воздействию. Он обрабатывается, в него вносятся удобрения и мелиоранты, средства защиты растений, высеваются семена сельскохозяйственных культур. Этот слой непрерывно изменяется по многим параметрам, как физико-химическим, оказывающим прямое воздействие на выращиваемые культуры, так и по физическим свойствам и, прежде всего, по влажности и плотности. Пахотный слой периодически пересыхает и увлажняется, причем периоды с резким дефицитом влаги в условиях ЦЧР могут быть продолжительными. Несомненно, что все это сказывается на режиме и доступности всех элементов питания, в том числе и фосфора.

Еще Д.Н. Прянишников указывал на необходимость регулирования биологического круговорота веществ в агроценозах [76]. Содержание элементов питания является заметно регулируемым параметром. Воздействие удобрений и дефеката оказывает прямое влияние на содержание и соотношение минеральных и органических

форм фосфора. Для органических форм фосфора характерна довольно высокая подвижность в почве. Это определяется свойствами минеральных и органических его форм. Ведь минеральные соли фосфора закрепляются главным образом в зоне их внесения или соприкосновения с почвой, а органический фосфор в форме глюкозофосфатов и глицерофосфатов может перемещаться по профилю [75, 87, 142].

Вопрос о соотношении органических и минеральных форм фосфора в черноземных почвах достаточно изучен. Так, по данным Л.И. Бреховой с соавт. [21], в верхней части профиля чернозема типичного на долю органофосфатов приходится до 50% от валового содержания фосфора. Органофосфаты в почве представлены, в основном, растительными остатками, микробной массой и остатками насекомых. Причем важно то, что значительная их масса представлена корневыми системами, которые остаются непосредственно в почве, а их масса сравнима или превышает надземную биомассу. Это легко трансформируемые вещества, являющиеся самыми доступными для растений источниками фосфора.

В наших исследованиях мы определяли различные формы фосфора – общий, минеральный и органический по методу Сендерса-Вильямса. По этому методу содержание изучаемых форм фосфора определяли в метровой толще. По методу Сендерса-Вильямса 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 трудоемкому и позволяющему получать хорошо воспроизводимые результаты.

В таблицах 15–23 и на рисунках 18–32 представлены данные по содержанию общего, минерального и органического фосфора, определенных по методу Сендерса-Вильямса и результаты корреляционного анализа.

Как установлено нами, экспериментальные данные существенно различаются по содержанию всех форм фосфора как по вариантам опыта, так и по годам наблюдений. В составе фосфатов, как и следовало ожидать, в отдельные годы преобладал минеральный фосфор, в другие же – органический. Это обусловлено различными гидротермическими условиями вегетационных периодов. Это сказалось как на развитии с.-х. культур, так и на содержании разных форм фосфора.

Таблица 15 – Влияние систем применения удобрения и дефеката на содержание общего фосфора, мг/кг P₂O₅

Варианты опыта	Слой, см	Годы					
		2015	2016	2017	2018	2019	2020
Контроль	0–20	252	712	522	562	207	330
	20–40	220	690	413	518	155	250
	40–60	172	562	460	355	191	272
	60–80	134	456	343	252	215	255
	80–100	174	435	228	217	243	283
Фон органический	0–20	296	804	610	459	293	355
	20–40	404	722	550	405	267	394
	40–60	367	700	404	294	237	296
	60–80	250	456	342	231	289	252
	80–100	228	419	281	265	276	194
Фон + НРК60	0–20	363	850	624	602	320	506
	20–40	244	570	684	435	307	344
	40–60	169	469	427	289	276	228
	60–80	134	438	363	259	307	244
	80–100	146	440	333	233	217	276
Фон + НРК120	0–20	357	916	776	634	283	516
	20–40	346	726	750	569	259	307
	40–60	313	402	536	409	280	350
	60–80	309	465	335	252	250	278
	80–100	355	410	304	235	207	241
Фон + дефекат	0–20	270	806	570	502	335	318
	20–40	244	664	566	454	296	259
	40–60	233	556	427	217	278	307
	60–80	204	522	421	248	209	305
	80–100	235	394	355	107	171	204
Дефекат + НРК60	0–20	415	802	600	241	396	386
	20–40	392	558	298	289	280	315
	40–60	261	438	465	348	315	367
	60–80	254	604	413	257	305	324
	80–100	243	552	350	261	298	333
НСП ₀₅		170,85					

Как следует из данных таблицы 15, содержание общего фосфора очень резко изменяется во времени и пространстве. Так, в пахотном слое контрольного варианта его содержание находилось в диапазоне 207–712 мг/кг, а среднее за наблюдаемый период составляло 431 мг/кг. На варианте органической системы

удобрения его содержание изменялось в пределах 293–804 мг/кг, а среднее составляло 465 мг/кг, т.е. было выше, чем на абсолютном контроле. На органоминеральной системе удобрения с одинарной и двойной дозой минеральных удобрений содержание общего фосфора изменялось в пределах 320–850 и 283–916 мг/кг, а среднее содержание – 544 и 580 мг/кг соответственно.

На вариантах с дефекатом по органическому фону и с одинарной дозой минеральных удобрений 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 с органической системой удобрения.

Обратим внимание на амплитуду колебания содержания общего фосфора по вариантам опыта. На контроле содержание общего фосфора составляло 505 мг/кг, на органической системе удобрения – 511 мг/кг, на вариантах органоминеральной системы с одинарной и двойной дозами минеральных удобрений – 530 и 633 мг/кг соответственно, а на вариантах с дефекатом по органическому фону и с одинарной дозой минеральных удобрений – 536 и 561 мг/кг соответственно. То есть внесение органических, органоминеральных удобрений и дефеката по органическому фону и совместно с одинарной дозой минеральных удобрений повышает амплитуду колебаний содержания общего фосфора относительно контроля на 1,2, 4,9, 25,1, 6,1 и 11,1% соответственно.

Содержание и характер распределения по профилю на вариантах опыта общего фосфора представлено на рисунке 18. Отметим, что максимальное содержание общего фосфора наблюдалось в 2016 г. на варианте с ячменем, а минимальное – в 2019 г. под культурой сахарной свеклы.

Представляет интерес и характер распределения по профилю общего фосфора. Он неодинаков как по годам наблюдений, так и по вариантам опыта. Однако на варианте контроля он преимущественно аккумулятивно-элювиально-иллювиальный. На вариантах с удобрениями он преимущественно прогрессивно убывающий.

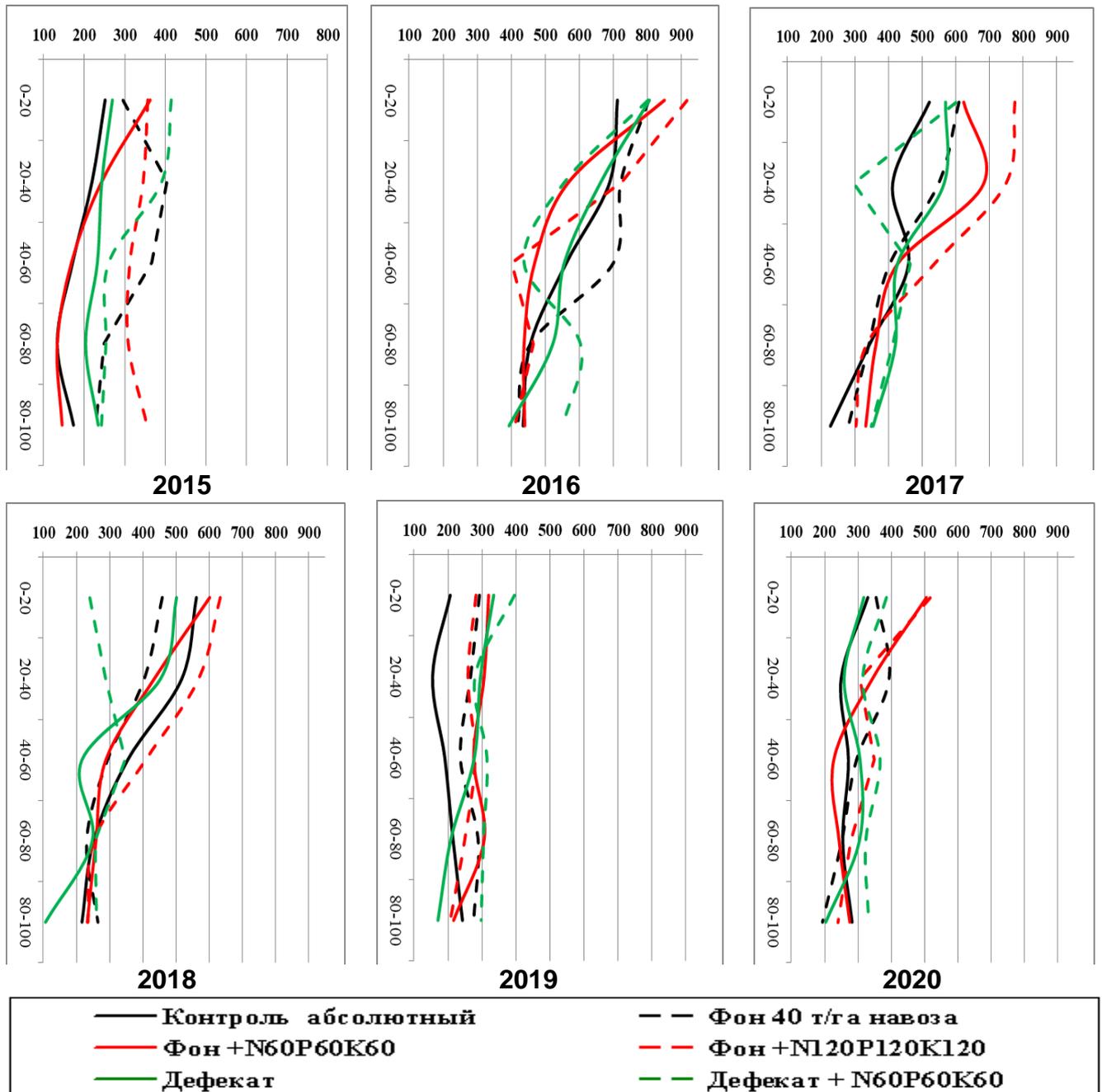


Рисунок 18 – Влияние систем удобрения и дефеката на содержание общего фосфора, мг/кг P_2O_5

На варианте с дефекатом по органическому фону тип распределения общего фосфора прогрессивно-аккумулятивный, а с дефекатом совместно с одинарной дозой минеральных удобрений – аккумулятивно-элювиально-иллювиальный.

Следует отметить, что на вариантах органоминеральной системы удобрения профиль почвы наиболее дифференцирован по содержанию общего фосфора. На вариантах органической системы удобрения и с дефекатом по органическому фону степень дифференциации профилю по общему фосфору минимальна.

На рисунке 19 показано изменение содержания общего фосфора по профилю за период наблюдений.

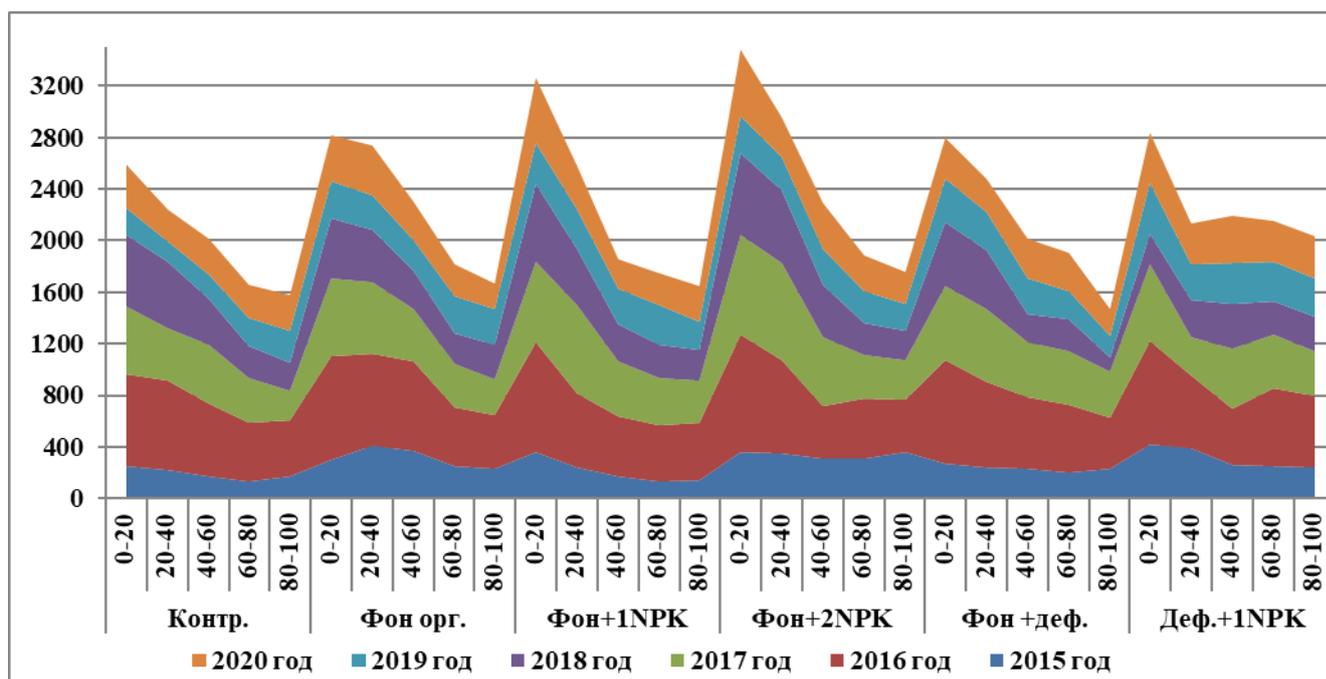


Рисунок 19 – Влияние систем удобрения и дефеката на изменение содержания общего фосфора, мг/кг P₂O₅

Выявленная нами тенденция повышения содержания общего фосфора под влиянием систем применения удобрения и дефеката хорошо выражена на этом рисунке. Содержание общего фосфора на органической системе удобрения превышает его уровень на контроле примерно на 200 мг/кг, на органоминеральной системе удобрения с одинарной и двойной дозой минеральных удобрений это превышение составляет 600 и 800 мг/кг соответственно, на вариантах с последствием дефеката – 200 мг/кг. Это повышение содержания общего фосфора на удобренных вариантах и вариантах с дефекатом наблюдается на фоне более высокой урожайности сельскохозяйственных культур на этих вариантах.

Полученные нами данные позволяют сделать заключение о возможном процессе зафосфачивания. Это понятие «зафосфачивание» почв было выдвинуто А.В. Соколовым в 1958 г. при исследовании обогащенности почв подвижными фосфатами в результате длительного внесения фосфорных удобрений [140]. Насколько уместно говорить о данном процессе? Ведь до недавнего времени подавляющее большинство экспериментальных исследований и научных трудов было посвяще-

но проблеме дефицита фосфорного питания растений и способам оптимального внесения фосфорных удобрений в почву. Считаем, что проблема избытка фосфора в почвах, в том числе и черноземах, находящихся под антропогенной нагрузкой, изучена недостаточно.

Общий фосфор представлен в почве многочисленными минералами, имеющими различную степень дисперсности. Количество их неравномерно распределяется по гранулометрическим фракциям. Считается, что с увеличением степени дисперсности минеральных частиц происходит их обогащение содержащими фосфор минералами, поэтому необходимы данные по определению гранулометрического состава. В таблице 16 приведены полученные нами данные по гранулометрическому составу по вариантам опыта.

Оценка гранулометрического состава выполнена по единой шкале В.И. Кирюшина [75, 77]. Судя по данным таблицы 16, по гранулометрическому составу пахотного слоя изучаемая почва является среднесуглинистой, за исключением вариантов органоминеральной системы с одинарной дозой минеральных удобрений и с дефекатом по органическому фону (тяжелосуглинистый), при этом опытный участок может считаться по этому показателю однородным. Ведь содержание физической глины (частицы $< 0,01$ мм) варьируют в этом слое в пределах 32,12–37,60%. Тем не менее, следует отметить то, что содержание отдельных фракций на вариантах опыта изменяется довольно значительно. Так, содержание крупного и среднего песка (1–0,25 мм) варьирует в пахотном слое в пределах 9,17–19,11%. Содержание фракции мелкого песка (0,25–0,05 мм) находится в диапазоне 1,63–34,12%.

Содержание фракции крупной пыли (0,05–0,01 мм), т.н. лессовой фракции, варьирует в пределах 17,80–46,90%. Столь высокое содержание указывает на то, что почвообразующей породой для изучаемой почвы был лесс. Но в процессе почвообразования именно эта фракция подверглась наибольшей трансформации. Эта фракция изначально была обогащена карбонатами кальция. В процессе декальцинирования, выявленном в исследованиях К.Е. Стекольниковой (2011), карбонаты подверглись выщелачиванию нисходящим током воды, что и обусловило количественные изменения этой фракции.

Таблица 16 – Гранулометрический состав изучаемой почвы

Варианты опыта	Слой, см	Размеры фракций, мм, содержание, %						∑ частиц		Гран. состав
		1–0,25	0,25–0,05	0,05–0,01	0,01–0,005	0,005–0,001	<0,001	> 0,01	< 0,01	
Контроль	0–20	9,17	15,03	43,68	8,02	2,60	21,50	67,88	32,12	Ср. суглин.
	20–40	8,18	15,98	43,50	0,74	2,30	29,30	67,66	32,34	–//–
	40–60	6,50	22,20	30,38	4,60	3,34	32,98	59,08	40,92	Т. суглин.
	60–80	6,07	22,97	36,34	2,58	0,26	31,78	65,38	34,62	Ср. суглин.
	80–100	6,24	18,70	34,10	2,96	3,62	34,38	59,04	40,96	Т. суглин.
Фон органический	0–20	9,95	10,71	46,90	1,28	3,36	27,80	63,56	32,44	Ср. суглин.
	20–40	7,50	43,90	11,30	5,24	2,32	29,74	62,70	37,30	–//–
	40–60	6,76	28,80	18,84	6,70	6,20	32,70	54,40	45,60	Т. суглин.
	60–80	5,13	18,13	36,28	1,02	3,20	36,24	59,54	40,46	Т. суглин.
	80–100	4,85	28,99	14,36	10,94	6,36	34,50	48,20	51,80	Л. глин.
Фон + 1NPK	0–20	9,40	19,82	20,92	18,16	8,24	23,46	50,14	49,86	Т. суглин.
	20–40	10,33	36,11	10,76	10,16	5,94	26,70	57,20	42,80	–//–
	40–60	7,56	15,92	39,44	1,80	12,12	23,16	62,92	37,08	Ср. суглин.
	60–80	10,95	15,25	39,64	5,54	1,56	27,06	65,84	34,16	–//–
	80–100	12,18	30,60	25,58	4,84	3,76	23,04	68,36	31,64	–//–
Фон + 2NPK	0–20	19,11	1,63	45,82	3,78	2,46	27,20	66,56	33,44	Ср. суглин.
	20–40	7,74	24,16	34,06	1,50	2,96	29,58	65,96	34,04	–//–
	40–60	5,83	9,33	47,82	2,26	3,36	31,40	62,98	37,02	–//–
	60–80	7,05	13,27	43,26	2,32	2,44	31,66	63,58	36,42	–//–
	80–100	5,60	44,58	12,80	0,14	4,80	32,08	62,98	37,02	–//–
Фон + дефект	0–20	10,44	23,76	21,88	12,80	15,76	15,36	56,08	43,92	Т. суглин.
	20–40	10,61	40,87	12,82	4,72	12,76	18,22	64,30	35,70	Ср. суглин.
	40–60	9,08	42,54	4,24	5,12	14,44	24,58	55,86	44,14	Т. суглин.
	60–80	8,97	20,43	23,26	5,78	14,10	27,46	52,66	47,34	–//–
	80–100	17,91	41,69	8,20	3,32	9,84	19,04	67,80	32,20	Ср. суглин.
Дефект + 1NPK	0–20	10,48	34,12	17,80	2,10	17,00	18,50	62,40	37,60	Ср. суглин.
	20–40	9,14	31,02	22,92	5,54	2,08	29,30	63,08	36,92	Ср. суглин.
	40–60	8,43	33,51	12,68	3,50	16,76	25,12	54,62	45,38	Т. суглин.
	60–80	8,44	42,78	12,32	5,00	9,80	21,66	53,54	36,46	Ср. суглин.
	80–100	8,61	52,61	3,08	2,28	12,90	20,52	54,30	35,70	–//–

Содержание тонкодисперсных фракций в пахотном слое на вариантах опыта также неодинаково. Так, содержание фракции средней пыли (0,01–0,005 мм) изменяется в пределах 1,28–18,16%. Содержание фракции тонкой пыли (0,005–0,001 мм) находится в диапазоне 2,46–17,00%. Содержание ила (< 0,001 мм) находится в пределах 15,36–27,80%.

Важным генетическим признаком чернозема выщелоченного является хорошо выраженная дифференциация почвенного профиля по содержанию тонкодисперсных фракций и, прежде всего, ила. В нашем случае эта дифференциация наблюдается на всех вариантах опыта, но она неодинакова. И это необходимо учитывать при оценке режима фосфора в изучаемой почве. Так, на варианте контроля максимум содержания ила отмечается в слоях 40–60 и 80–100 см – 32,90 и 34,38% соответственно.

На варианте органической системы удобрения, органоминеральной системы удобрения и с дефекатом по органическому фону этот максимум наблюдается в слое 40–60 см, т.е. нижней части гумусового слоя – 36,24, 27,06 и 27,46% соответственно.

На варианте органоминеральной системы удобрения с двойной дозой минеральных удобрений максимум содержания ила наблюдается в слое 80–100 см – 32,08%, а на варианте с дефекатом – в слое 20–40 см – 29,30% соответственно. Все это, несомненно, сказалось на характере распределения и закрепления на минеральной матрице различных форм фосфора, что и установлено в результате математической обработки (Таблица 17).

Как следует из данных таблицы 17, на варианте контроля 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. На варианте органической системы удобрения связь содержания общего фосфора с гранулометрическими фракциями совершенно иная. Если с фракцией крупного и среднего песка связь остается в пределах средней и тесной ($r = 0,53-0,950$), с фракцией мелкого песка, крупной и средней пыли она преимущественно отсутствует или очень слабая.

Таблица 17 – Коэффициенты корреляции (*r*) связи содержания общего фосфора с гранулометрическими фракциями

Фракции	1–0,25	0,25–0,05	0,05–0,01	0,01–0,005	0,005–0,001	< 0,001	< 0,01
Контроль, <i>r</i>							
2015 г.	0,920	–0,664	0,732	0,694	–0,045	–0,989	–0,718
2016 г.	0,522	–0,333	0,590	0,613	–0,474	–0,793	–0,674
2017 г.	0,972	–0,846	0,858	0,281	0,091	–0,832	–0,754
2018 г.	0,964	–0,819	0,901	0,254	–0,031	–0,851	–0,829
2019 г.	0,684	–0,606	0,476	0,874	0,193	–0,828	–0,353
2020 г.	–0,926	0,901	–0,875	–0,109	–0,145	0,722	0,718
Фракции	1–0,25	0,25–0,05	0,05–0,01	0,01–0,005	0,005–0,001	< 0,001	< 0,01
Фон органический, <i>r</i>							
2015 г.	0,903	–0,476	0,549	–0,283	–0,128	–0,844	–0,576
2016 г.	0,906	–0,436	0,624	–0,508	–0,502	–0,854	–0,797
2017 г.	0,906	–0,580	0,694	–0,468	–0,291	–0,807	–0,701
2018 г.	0,962	0,179	0,426	–0,465	–0,568	–0,961	–0,839
2019 г.	0,729	–0,742	0,779	0,752	–0,177	–0,603	–0,552
2020 г.	0,755	0,353	–0,069	–0,289	0,498	–0,820	–0,659
Фракции	1–0,25	0,25–0,05	0,05–0,01	0,01–0,005	0,005–0,001	< 0,001	< 0,01
Фон + N₆₀P₆₀K₆₀, <i>r</i>							
2015 г.	–0,377	0,135	–0,628	0,867	0,358	0,108	0,985
2016 г.	–0,005	0,062	–0,518	0,935	0,137	–0,325	0,820
2017 г.	–0,076	0,382	–0,812	0,885	0,246	0,090	0,934
2018 г.	–0,277	0,153	–0,639	0,921	0,394	–0,242	0,956
2019 г.	–0,087	0,054	–0,498	0,892	0,254	–0,438	0,581
2020 г.	–0,123	0,088	–0,601	0,975	0,087	0,146	0,939
Фракции	1–0,25	0,25–0,05	0,05–0,01	0,01–0,005	0,005–0,001	< 0,001	< 0,01
Фон + N₁₂₀P₁₂₀K₁₂₀, <i>r</i>							
2015 г.	0,183	–0,813	0,849	0,690	0,492	–0,069	0,174
2016 г.	0,923	–0,483	0,309	0,655	–0,546	–0,986	–0,962
2017 г.	0,802	–0,445	0,316	0,577	–0,533	–0,962	–0,987
2018 г.	0,595	–0,355	0,286	0,429	–0,445	–0,850	–0,919
2019 г.	0,791	–0,048	–0,193	0,274	0,097	–0,682	–0,536
2020 г.	0,984	–0,557	0,360	0,741	–0,571	–0,959	–0,877
Фракции	1–0,25	0,25–0,05	0,05–0,01	0,01–0,005	0,005–0,001	< 0,001	< 0,01
Фон + дефекат, <i>r</i>							
2015 г.	–0,378	–0,121	0,259	0,726	0,581	–0,699	0,086
2016 г.	0,220	–0,189	0,215	0,787	0,261	–0,825	–0,089
2017 г.	–0,006	–0,388	0,453	0,903	0,443	–0,790	0,070
2018 г.	–0,435	–0,464	0,584	0,869	0,680	–0,607	0,275
2019 г.	–0,234	–0,062	0,247	0,655	0,430	–0,792	–0,081
2020 г.	–0,005	–0,274	0,407	0,823	0,375	–0,872	–0,064
Фракции	1–0,25	0,25–0,05	0,05–0,01	0,01–0,005	0,005–0,001	< 0,001	< 0,01
Дефекат + N₆₀P₆₀K₆₀, <i>r</i>							
2015 г.	0,960	–0,569	0,707	–0,148	–0,049	–0,108	–0,250
2016 г.	0,877	–0,149	0,171	–0,607	0,543	–0,726	–0,175
2017 г.	0,887	–0,441	0,392	–0,474	0,522	–0,518	–0,068
2018 г.	0,948	–0,668	0,745	–0,148	0,028	–0,074	0,093
2019 г.	0,871	–0,285	0,282	–0,510	0,528	–0,648	–0,076
2020 г.	0,940	–0,683	0,758	–0,133	0,016	–0,051	–0,082

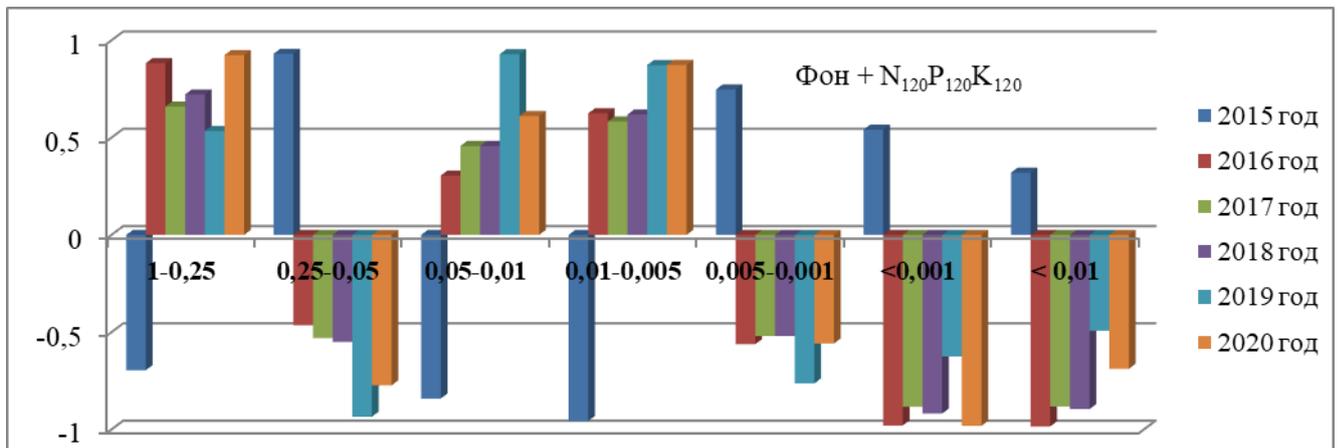
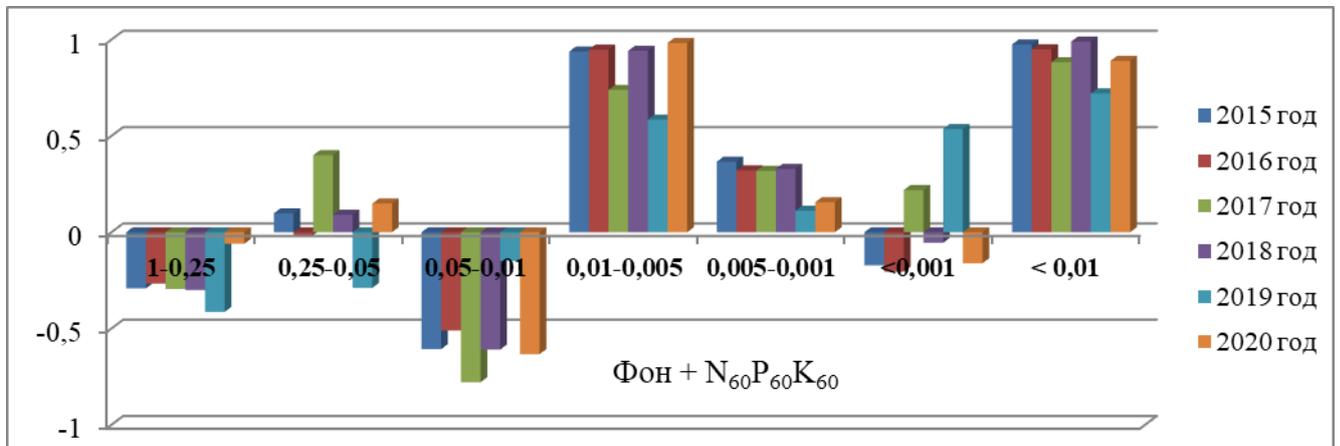
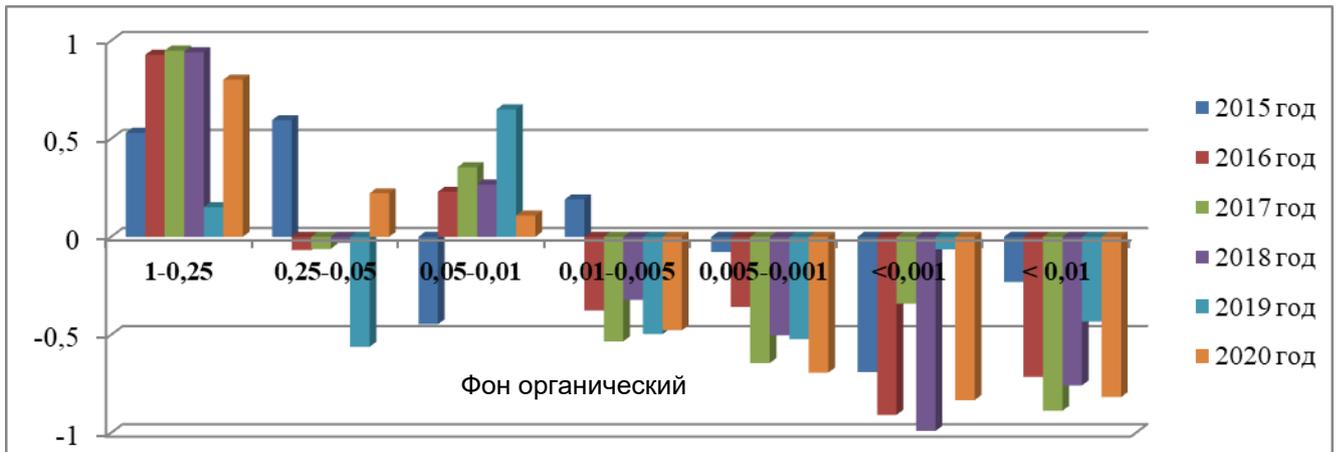
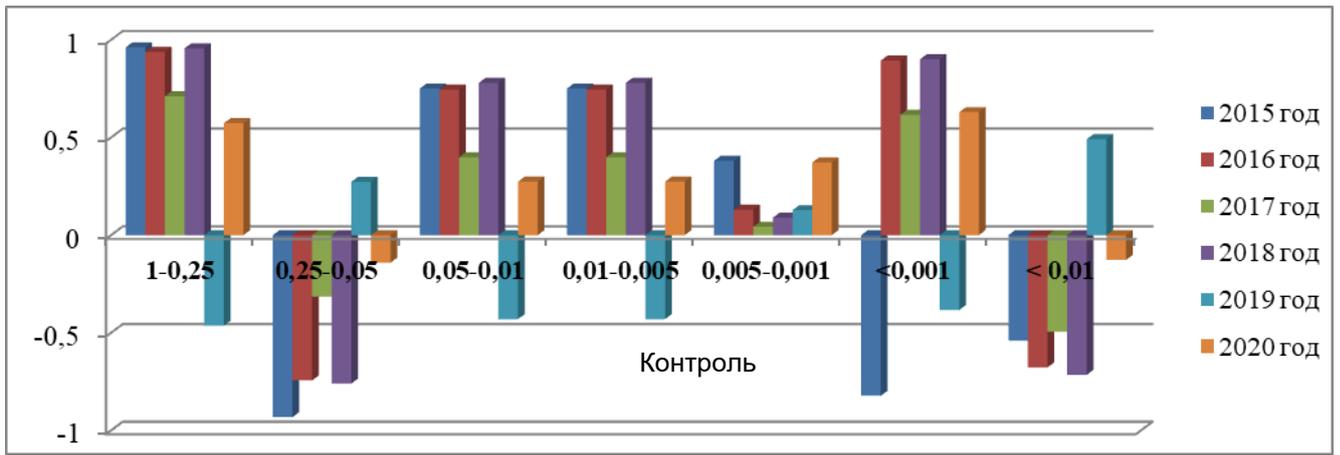
Как следует из данных таблицы 17, связь общего фосфора с фракцией тонкой пыли является отрицательной и варьирует в пределах от слабой до средней ($r = -0,322-0,533$). Связь содержания общего фосфора с содержанием ила и фракцией физической глины отрицательная и варьирует от слабой до очень тесной ($r = -0,342-0,990$) и ($r = -0,433-0,887$) соответственно.

На варианте органоминеральной системы удобрения с одинарной дозой минеральных удобрений установлена отрицательная средняя и высокая связь с содержанием крупной пыли ($r = -0,510-0,779$) и преимущественно тесная и очень тесная с содержанием фракции средней пыли ($r = 0,585-0,983$).

На варианте органоминеральной системы удобрения с двойной дозой минеральных удобрений выявлены совершенно иные закономерности. Установлена преимущественно средняя и тесная связь содержания общего фосфора с фракциями крупного и среднего песка, крупной и средней пыли и отрицательная, преимущественно средняя с фракциями мелкого песка и тонкой пыли. Связь содержания этой формы фосфора с илом и физической глиной отрицательная, преимущественно тесная и очень тесная ($r = -0,883-0,981$) и ($r = -0,688-0,984$) соответственно.

На варианте с дефекатом по органическому фону выявлена отрицательная связь содержания общего фосфора с фракциями крупного, среднего и мелкого песка и с илом – от средней до очень тесной. Связь этой формы фосфора с пылеватыми фракциями преимущественно средняя и тесная. На варианте с дефекатом совместно с одинарной дозой минеральных удобрений выявлена средняя и тесная связь содержания общего фосфора с фракциями крупного и среднего песка и с тонкой пылью. Связь содержания общего фосфора с фракциями средней пыли и илом отрицательная слабая и тесная ($r = -0,357-0,760$) и средняя и тесная ($r = -0,523-0,697$) соответственно.

Для большей наглядности характера связи общего фосфора с гранулометрическими фракциями мы представили результаты математической обработки на рисунке 20.



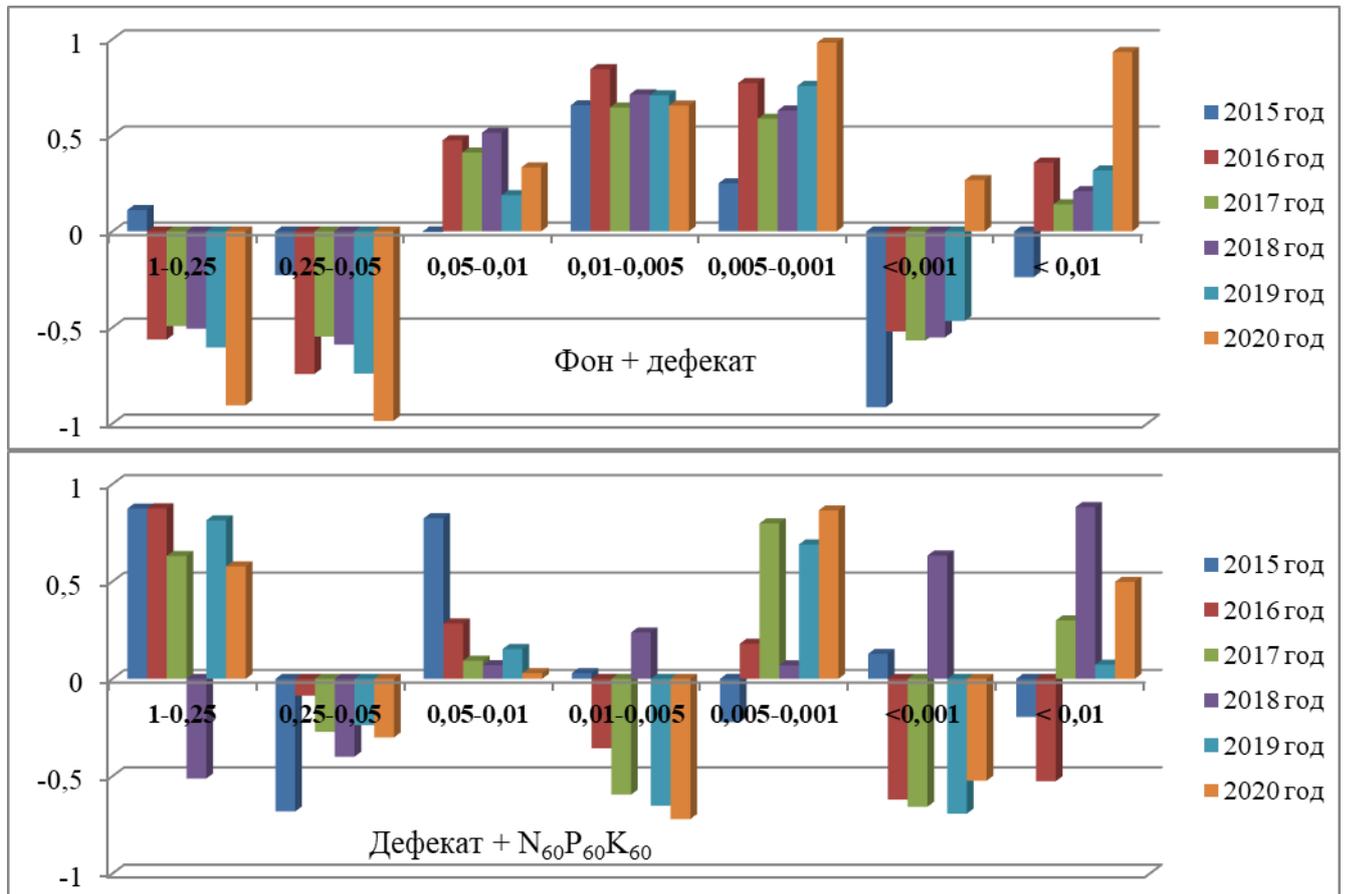


Рисунок 20 – Коэффициенты корреляции (r) связи содержания общего фосфора с гранулометрическими фракциями

В целом по сравнению с контролем органическая и органоминеральная системы удобрения оказывают существенное влияние на характер связи общего фосфора с гранулометрическими фракциями. Если на органической и органоминеральной системе удобрения с одинарной дозой минеральных удобрений повышается связь общего фосфора с тонкодисперсными фракциями, то с двойной дозой минеральных удобрений она высокая практически со всеми фракциями. На варианте с дефекатом по органическому фону высокая связь содержания органического фосфора только с пылеватыми фракциями, а на варианте с дефекатом совместно с одинарной дозой минеральных удобрений высокая с грубо- и тонкодисперсными фракциями [144].

В таблице 18 приведены данные по содержанию минерального фосфора, определенного по методу Сендерса-Вильямса. Как следует из данных таблицы 18, содержание минерального фосфора существенно изменяется как во времени, так и по профилю изучаемой почвы.

Таблица 18 – Влияние систем применения удобрения и дефеката на содержание минерального фосфора, мг/кг P_2O_5

Варианты опыта	Слой, см	Годы					
		2015	2016	2017	2018	2019	2020
Контроль	0–20	41	453	311	395	14	93
	20–40	74	503	208	354	33	15
	40–60	46	391	334	238	67	26
	60–80	13	228	240	138	89	7
	80–100	76	248	226	112	102	37
Фон органический	0–20	46	443	358	270	62	70
	20–40	263	452	404	248	148	64
	40–60	219	482	363	177	115	22
	60–80	150	230	216	126	158	58
	80–100	92	291	148	160	133	22
Фон + NPK60	0–20	106	498	339	367	103	188
	20–40	26	329	417	264	178	90
	40–60	36	265	281	158	164	59
	60–80	20	227	242	156	207	40
	80–100	68	196	205	109	81	109
Фон + NPK120	0–20	11	478	467	304	35	190
	20–40	107	400	482	295	126	70
	40–60	13	204	403	261	166	157
	60–80	33	241	211	152	150	61
	80–100	120	205	192	132	20	43
Фон + дефекат	0–20	24	449	367	313	133	18
	20–40	26	420	420	309	109	48
	40–60	64	313	303	117	157	164
	60–80	71	311	300	139	114	169
	80–100	107	118	214	28	66	33
Дефекат + NPK60	0–20	135	452	341	28	191	21
	20–40	166	334	188	118	166	35
	40–60	115	205	332	220	191	180
	60–80	102	354	292	138	171	159
	80–100	97	309	260	152	183	190

Так, в пахотном слое контрольного варианта содержание минерального фосфора изменялось в пределах 167–259 мг/кг, при среднем значении за изучаемый период 213 мг/кг. На варианте органической, органоминеральной системы применения удобрения с одинарной и двойной дозой минеральных удобрений 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. суще-

ственно выше, чем на контроле. Таким образом, внесение органических и органо-минеральных удобрений существенно повысило содержание минерального фосфора не только в пахотном слое, но и по всему профилю изучаемой почвы.

На вариантах с дефекатом по органическому фону и совместно с одинарной дозой минеральных удобрений 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. На рисунке 21 показано изменение содержания минерального фосфора и характер его распределения по профилю.

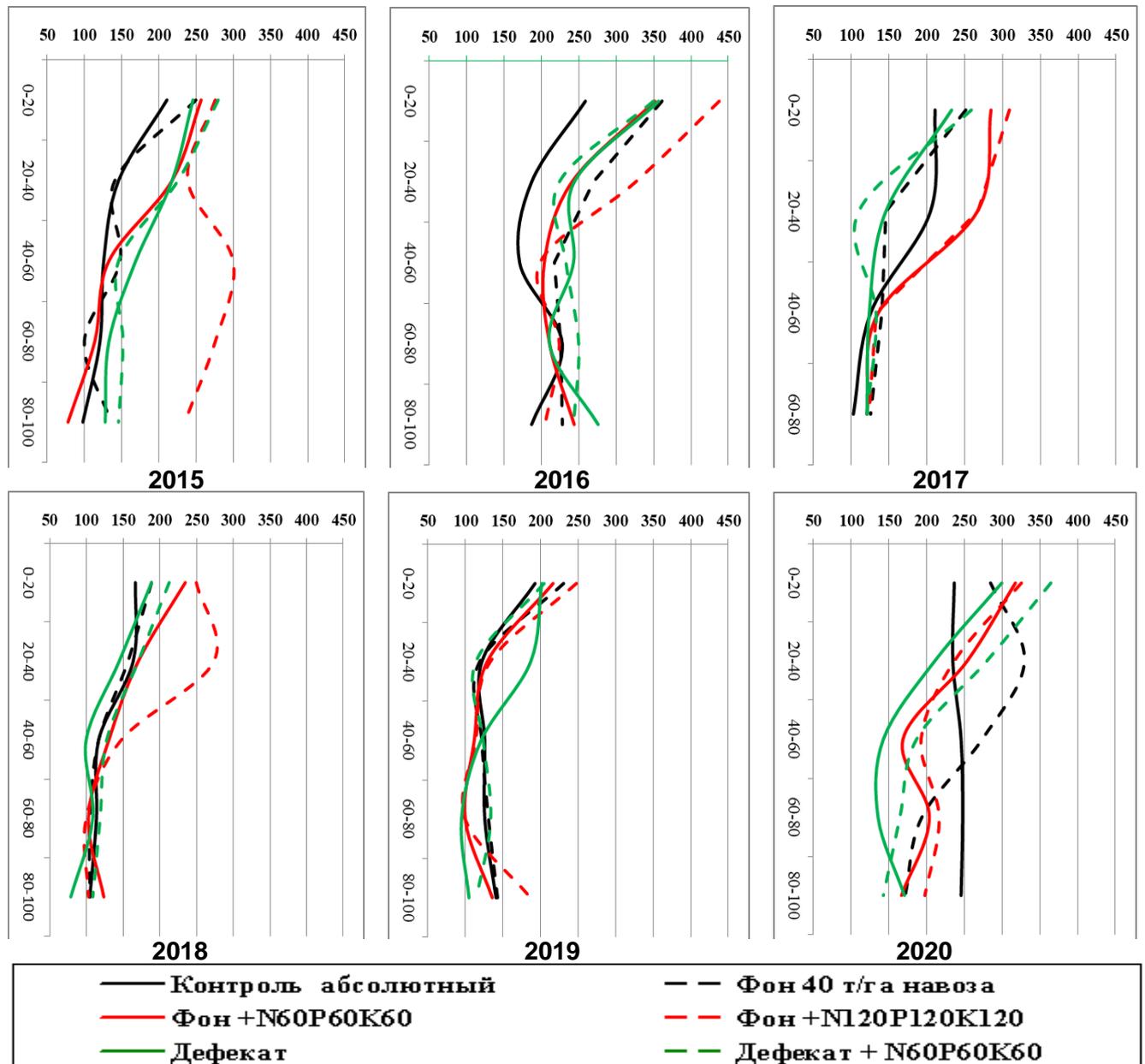


Рисунок 21 – Влияние систем удобрения и дефеката на изменение содержания минерального фосфора, мг/кг P_2O_5

Как следует из данных, приведенных на рисунке 22, характер распределения минерального фосфора неодинаков за период проведения исследования как по годам наблюдений, так и по вариантам опыта. Максимальное содержание минерального фосфора, так же как и общего фосфора, наблюдается под культурой севооборота ячмень в 2016 г., а минимальное – в 2019 г. под культурой сахарной свеклы. По всем годам наблюдений содержание минерального фосфора на удобренных вариантах и на вариантах применения дефеката было выше, чем на контроле в 2015–2020 гг. на 50–100, 100–170, 30–120, 30–70 и 30–130 мг/кг соответственно

Характер распределения по профилю преимущественно элювиально-иллювиальный на всех вариантах опыта за исключением варианта применения дефеката по органическому фону, на котором наблюдается наименьшая дифференциация профиля по содержанию минерального фосфора. Удобрения и дефекат совместно с одинарной дозой минеральных удобрений повышали степень дифференциации профиля по содержанию минерального фосфора [12, 142, 143].

На рисунке 22 показано изменение содержания минерального фосфора в целом за период наблюдений.

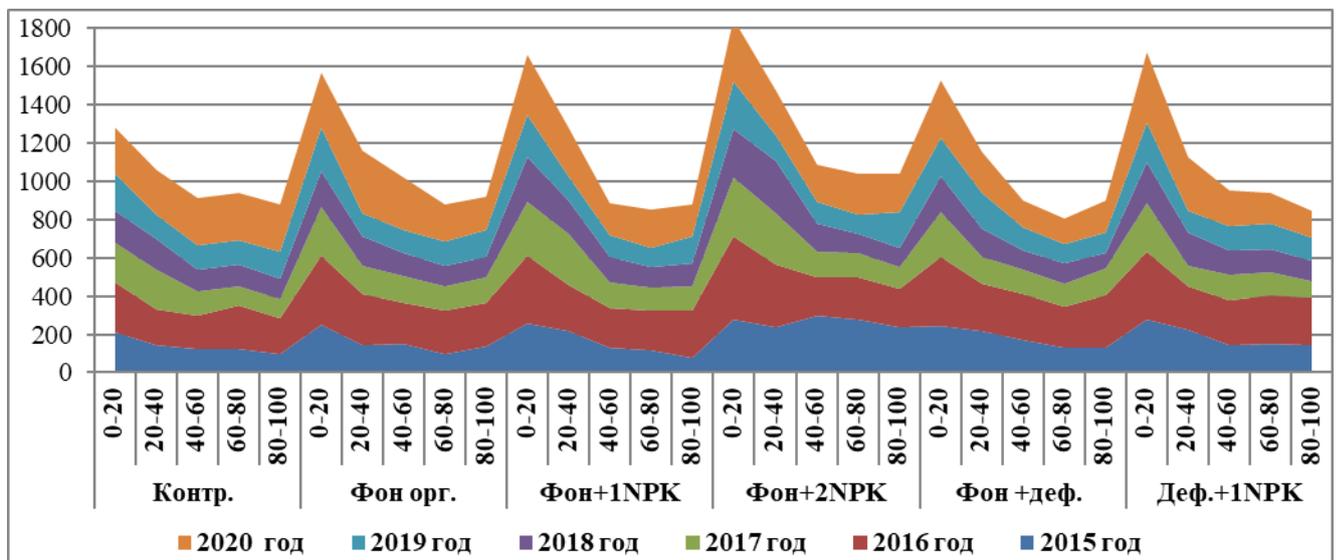


Рисунок 22 – Влияние систем удобрения и дефеката на изменение содержания минерального фосфора, мг/кг P₂O₅

Как следует из данных, приведенных на рисунке 23, за шесть лет наблюдений на удобренных вариантах и с дефекатом содержание минерального фосфора

было выше, чем на контроле на 240–520 мг/кг. Характер распределения – преимущественно аккумулятивно-элювиально-иллювиальный. Таким образом, в целом для минерального фосфора сохраняются закономерности, выявленные для общего фосфора.

Несколько иные закономерности связей наблюдаются по минеральному фосфору. Данные приведены в таблице 19 и на рисунке 24. Установлено, что на контроле, связь минерального фосфора с фракциями крупного и мелкого песка и крупной пылью высокая и очень высокая – ($r = 0,522-0,972$) и ($r = 0,476-0,901$) соответственно и отрицательная средняя и высокая с фракцией мелкого песка. Связь с илом высокая и очень высокая с физической глиной ($r = -0,333-0,846$), ($r = -0,722-0,989$) и ($r = -0,353-0,829$) соответственно.

На варианте органической системы удобрения выявлена связь от высокой до очень высокой с фракцией крупного и среднего песка и от средней до высокой с фракцией крупной пыли – ($r = 0,729-0,962$ и $r = 0,426-0,779$) соответственно. Связь этой формы фосфора с тонкодисперсными фракциями отрицательная слабая и средняя с фракциями средней и тонкой пыли и от средней до очень высокой с илом – ($r = -0,603-0,961$) и средней и высокой с фракцией физической глины – ($r = -0,552-0,8391$).

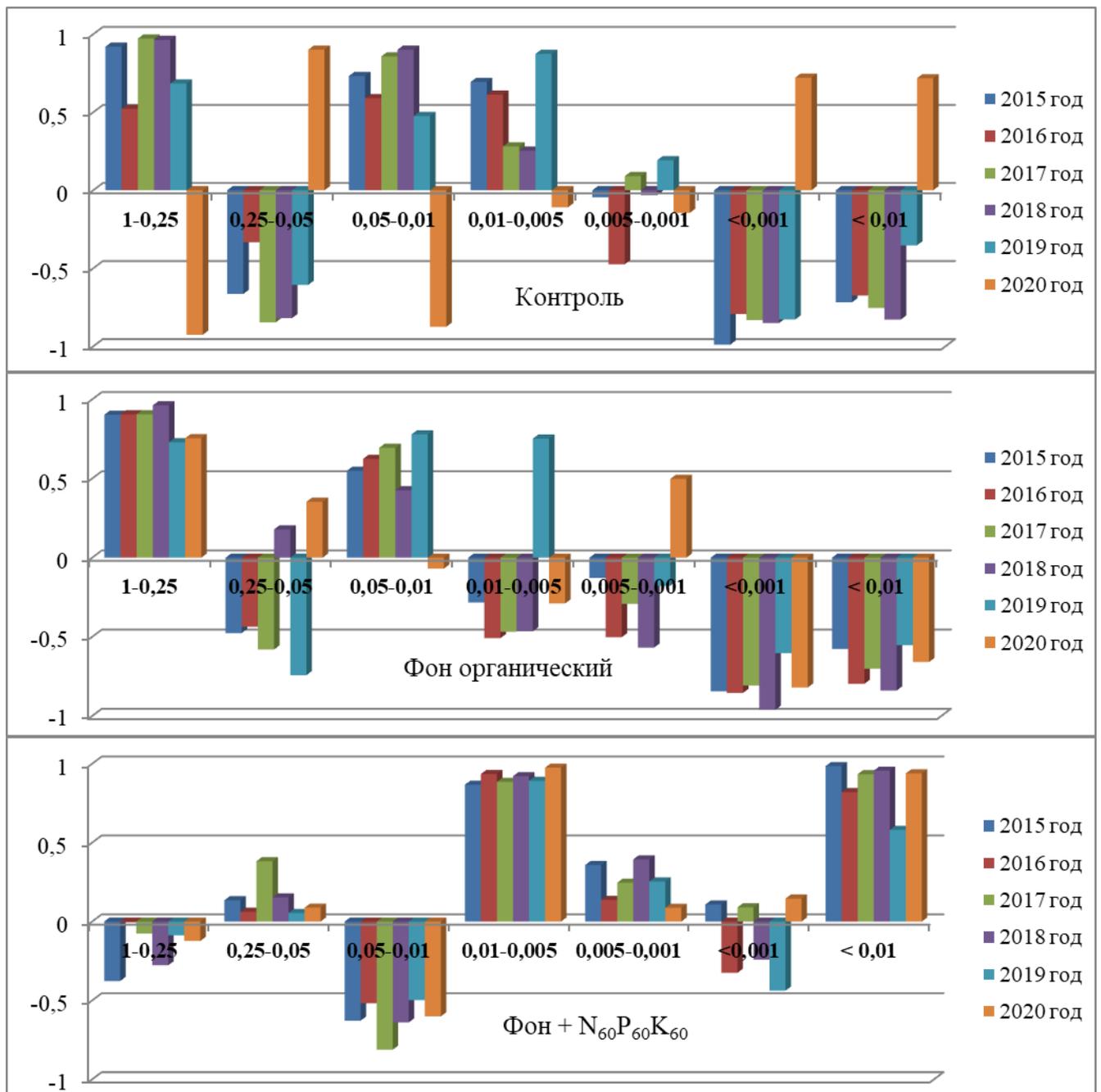
На варианте органоминеральной системы удобрения с одинарной дозой минеральных удобрений установлена высокая и очень высокая связь минерального фосфора с фракциями средней пыли и физической глины – ($r = 0,867-0,975$) и ($r = 0,81-0,985$) соответственно. Связь этой формы фосфора с фракцией грубой пыли отрицательная от слабой до сильной – ($r = -0,498-0,812$).

На варианте органоминеральной системы удобрения выявлена сильная и очень сильная связь содержания минерального фосфора с фракцией крупного и среднего песка ($r = 0,595-0,984$), а с фракцией средней пыли она варьирует от слабой до средней ($r = 0,429-0,741$). С фракциями ила и физической глины установлена отрицательная связь от средней до очень сильной ($r = -0,682-0,986$ и $r = -0,536-0,987$) соответственно.

Таблица 19 – Коэффициенты корреляции (r) связи содержания минерального фосфора с гранулометрическими фракциями

Фракции	1–0,25	0,25–0,05	0,05–0,01	0,01–0,005	0,005–0,001	< 0,001	< 0,01
Контроль, r							
2015 г.	0,179	–0,549	0,117	–0,320	0,746	0,180	0,232
2016 г.	0,830	–0,682	0,907	0,075	0,276	–0,610	–0,500
2017 г.	0,072	0,155	–0,298	0,803	0,293	–0,320	0,215
2018 г.	0,948	–0,740	0,746	0,388	0,118	–0,834	–0,683
2019 г.	–0,960	0,735	–0,774	–0,435	–0,055	0,881	0,727
2020 г.	0,699	–0,639	0,410	0,889	0,374	0,788	–0,245
Фракции	1–0,25	0,25–0,05	0,05–0,01	0,01–0,005	0,005–0,001	< 0,001	< 0,01
Фон органический, r							
2015 г.	0,189	0,811	–0,667	0,127	–0,172	0,066	0,057
2016 г.	0,726	0,271	–0,142	0,013	–0,031	–0,790	–0,363
2017 г.	0,762	0,246	–0,020	–0,360	–0,442	–0,773	–0,664
2018 г.	0,914	0,062	0,166	–0,230	–0,445	–0,993	–0,697
2019 г.	–0,808	0,584	–0,576	0,223	–0,089	0,705	0,425
2020 г.	0,600	–0,237	0,566	–0,820	–0,955	–0,524	–0,931
Фракции	1–0,25	0,25–0,05	0,05–0,01	0,01–0,005	0,005–0,001	< 0,001	< 0,01
Фон + N₆₀P₆₀K₆₀, r							
2015 г.	0,012	–0,021	–0,299	0,680	0,226	–0,681	0,531
2016 г.	–0,386	–0,052	–0,486	0,917	0,399	–0,138	0,984
2017 г.	–0,344	0,151	–0,715	0,569	0,322	0,350	0,772
2018 г.	–0,306	–0,058	–0,583	0,937	0,291	0,040	0,990
2019 г.	–0,250	–0,274	0,316	–0,315	–0,193	0,803	–0,128
2020 г.	0,019	0,196	–0,579	0,853	0,211	–0,482	0,729
Фракции	1–0,25	0,25–0,05	0,05–0,01	0,01–0,005	0,005–0,001	< 0,001	< 0,01
Фон + N₁₂₀P₁₂₀K₁₂₀, r							
2015 г.	–0,464	0,921	–0,892	–0,869	0,655	0,324	0,079
2016 г.	0,844	–0,445	0,300	0,599	–0,570	–0,966	–0,995
2017 г.	0,521	–0,549	0,518	0,546	–0,473	–0,770	–0,751
2018 г.	0,571	–0,613	0,574	0,614	–0,517	–0,796	–0,754
2019 г.	–0,473	–0,381	0,596	0,149	–0,434	0,333	0,261
2020 г.	0,700	–0,807	0,705	0,821	–0,443	–0,668	–0,401
Фракции	1–0,25	0,25–0,05	0,05–0,01	0,01–0,005	0,005–0,001	< 0,001	< 0,01
Фон + дефекат, r							
2015 г.	0,645	0,254	–0,392	–0,642	–0,703	0,424	–0,293
2016 г.	–0,766	–0,378	0,474	0,670	0,809	–0,269	0,466
2017 г.	–0,629	–0,143	0,327	0,427	0,562	–0,342	0,182
2018 г.	–0,521	–0,299	0,480	0,647	0,601	–0,523	0,183
2019 г.	–0,853	–0,158	0,012	0,446	0,872	0,233	0,747
2020 г.	–0,576	–0,135	–0,072	–0,327	0,288	0,963	0,657
Фракции	1–0,25	0,25–0,05	0,05–0,01	0,01–0,005	0,005–0,001	< 0,001	< 0,01
Дефекат + N₆₀P₆₀K₆₀, r							
2015 г.	0,515	–0,789	0,913	0,406	–0,551	0,610	–0,041
2016 г.	0,803	–0,043	0,326	–0,184	–0,043	–0,509	–0,687
2017 г.	0,226	–0,033	–0,249	–0,603	0,933	–0,673	0,490
2018 г.	–0,905	0,174	–0,424	0,237	0,024	0,432	0,595
2019 г.	0,299	0,012	–0,339	–0,860	0,954	–0,562	0,540
2020 г.	–0,849	0,659	–0,845	–0,115	0,300	–0,135	0,276

На варианте применения дефектата по органическому фону выявлена средняя и сильная связь с содержанием фракций средней и тонкой пыли ($r = 0,655-0,903$) и ($r = 0,375-0,680$) соответственно. Связь с илом отрицательная от средней до сильной ($r = -0,607-0,872$). На варианте применения дефектата совместно с одинарной дозой минеральных удобрений установлена средняя и сильная связь содержания минерального фосфора с фракциями крупного и среднего фосфора и отрицательная слабая и средняя с фракцией мелкого песка ($r = 0,871-0,960$) и ($r = -0,441-0,683$) соответственно. На рисунке 23 выявленные связи содержания минерального фосфора с гранулометрическими фракциями представлены более наглядно.



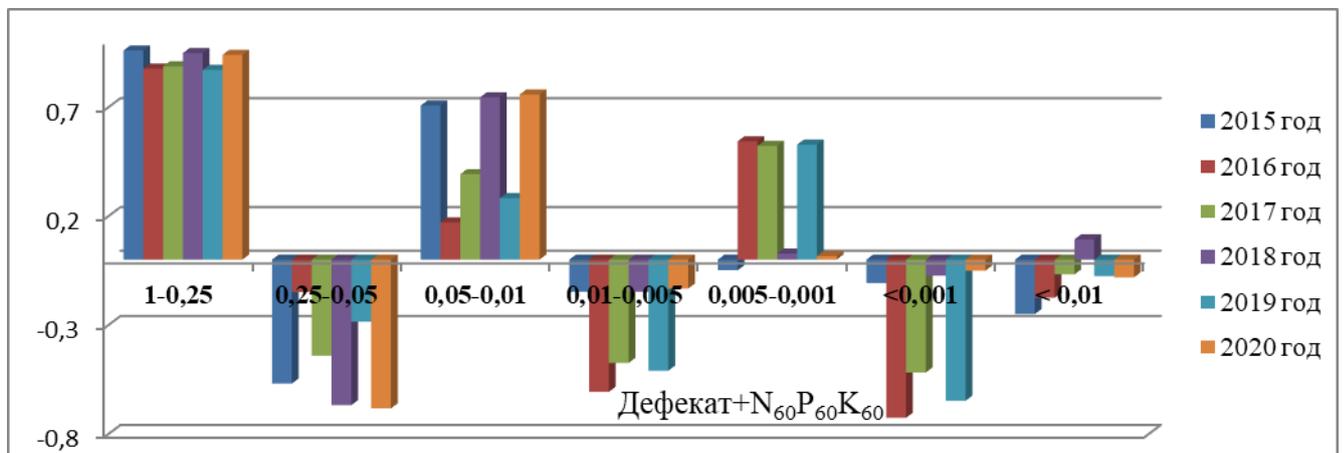
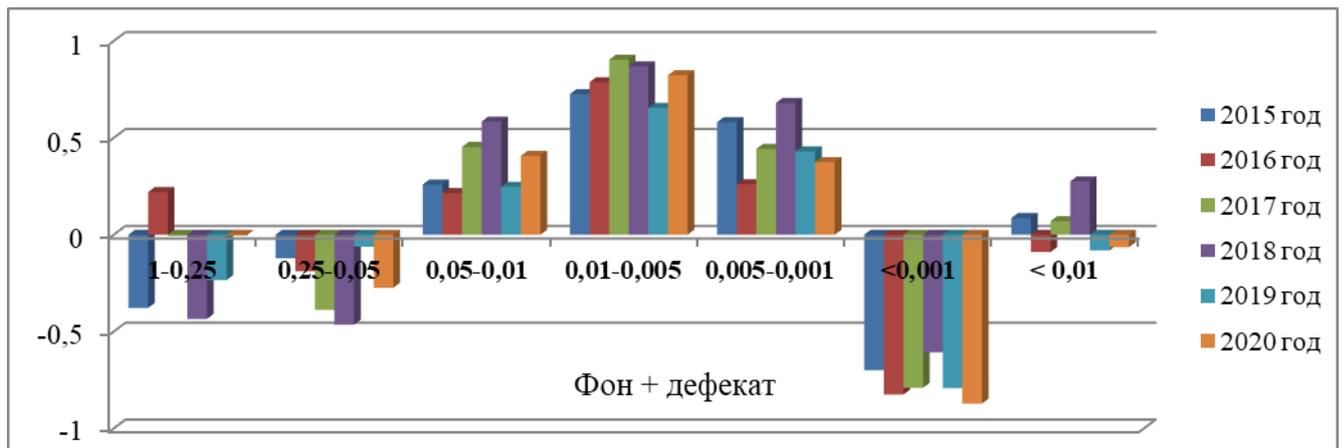
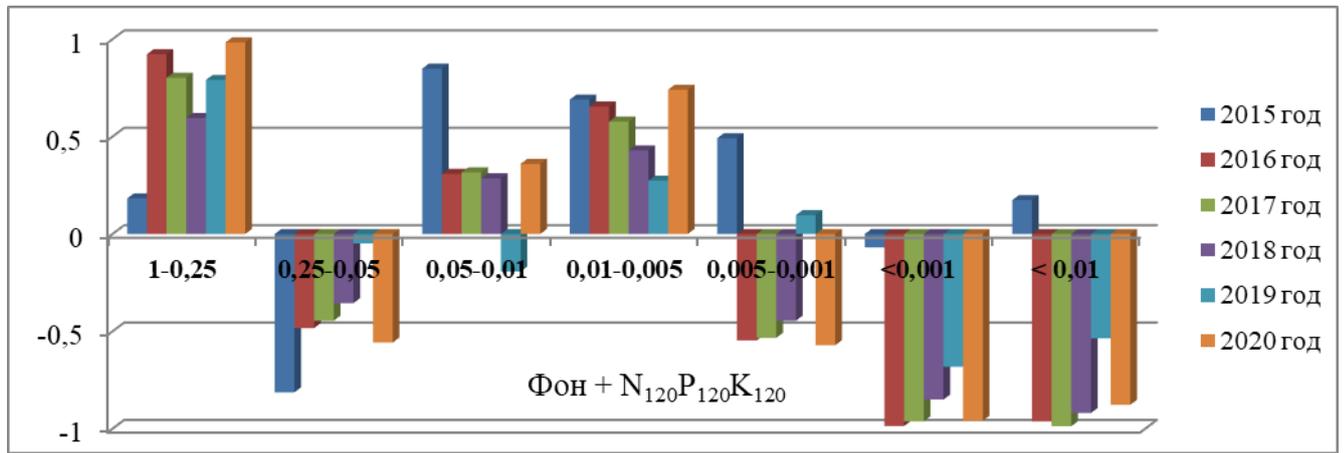


Рисунок 23 – Коэффициенты корреляции (r) связи содержания минерального фосфора с гранулометрическими фракциями

Установлено, что внесение органических, минеральных удобрений и дефекагта обуславливают перераспределение минерального фосфора по гранулометрическим фракциям. Надо полагать, что и сами сельскохозяйственные 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 сельскохозяйственных культур. Так, на варианте контроля и органической системы удобрения 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 отрицательная высокая и средняя ($r = -0,846$ и $r = -0,590$), и высокая ($r = -0,832$ и $r = -0,807$), ($r = -0,754$ и $r = -0,701$) соответственно.

На варианте органоминеральной системы удобрения с одинарной дозой минеральных удобрений 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 двойной дозой минеральных удобрений 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 применения дефеката по органическому фону выявлена очень высокая связь содержания минеральных фосфатов с фракцией средней пыли $r = 0,903$ и высокая отрицательная с илом – $r = 0,790$ соответственно. На варианте применения дефеката совместно с одинарной дозой минеральных удобрений 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 – $r = -0,518$.

Данные по влиянию применения систем удобрения и дефеката на содержание и характер распределения по профилю органического фосфора представлены в таблице 20.

Таблица 20 – Влияние систем применения удобрения и дефеката на содержание органического фосфора, мг/кг P_2O_5

Варианты опыта	Слой, см	Годы					
		2015	2016	2017	2018	2019	2020
Контроль	0–20	41	453	311	395	14	93
	20–40	74	503	208	354	33	15
	40–60	46	391	334	238	67	26
	60–80	13	228	240	138	89	7
	80–100	76	248	226	112	102	37
Фон органический	0–20	46	443	358	270	62	70
	20–40	263	452	404	248	148	64
	40–60	219	482	363	177	115	22
	60–80	150	230	216	126	158	58
	80–100	92	291	148	160	133	22
Фон + NPK60	0–20	106	498	339	367	103	188
	20–40	26	329	417	264	178	90
	40–60	36	265	281	158	164	59
	60–80	20	227	242	156	207	40
	80–100	68	196	205	109	81	109
Фон + NPK120	0–20	11	478	467	304	35	190
	20–40	107	400	482	295	126	70
	40–60	13	204	403	261	166	157
	60–80	33	241	211	152	150	61
	80–100	120	205	192	132	20	43
Фон + дефекат	0–20	24	449	367	313	133	18
	20–40	26	420	420	309	109	48
	40–60	64	313	303	117	157	164
	60–80	71	311	300	139	114	169
	80–100	107	118	214	28	66	33
Дефекат + NPK60	0–20	135	452	341	28	191	21
	20–40	166	334	188	118	166	35
	40–60	115	205	332	220	191	180
	60–80	102	354	292	138	171	159
	80–100	97	309	260	152	183	190

Отметим, что, так же как и по содержанию общего и минерального фосфора, для органического фосфора выявлена высокая изменчивость как по годам наблюдений, так и по вариантам опыта. Содержание органического фосфора в пахотном слое контрольного варианта изменялось в пределах 14–453 мг/кг, при среднем значении за период наблюдений 218 мг/кг.

На варианте органической системы удобрения содержание этой формы фосфора варьировало в пределах 46–443 мг/кг, при значении среднего содержания 208 мг/кг. По органоминеральной системе удобрения с одинарной и двойной дозой минеральных удобрений содержание органического фосфора изменялось в пределах 103–498 и 11–478 мг/кг, при среднем содержании 267 и 249 мг/кг соответственно.

На вариантах с дефекатом по органическому фону и с одинарной дозой минеральных удобрений содержание этой формы фосфора изменялось в пределах 18–449 и 21–452 мг/кг, при значениях среднего содержания 217 и 195 мг/кг соответственно, т.е. на уровне вариантов контроля и органической системы удобрения.

Как следует из данных таблицы 20, максимальное содержание органического фосфора наблюдалось в 2016 г., а минимальное – в 2020 г. Наиболее неравномерное изменение содержания органофосфатов по профилю изучаемой почвы наблюдались в 2015 г.

На контроле содержание органофосфатов за наблюдаемый период изменялось в пахотном слое в пределах 14–453 мг/кг, при значении среднего содержания 218 мг/кг. На варианте органической системы удобрения содержание органофосфатов варьировало в пределах 46–443 мг/кг, в среднем – 208 мг/кг. На вариантах с органоминеральной системой удобрения с одинарной и двойной дозой минеральных удобрений содержание органофосфатов изменялось в пределах 103–498 мг/кг и 11–478 г/кг, а среднее – 267 и 247 мг/кг соответственно, т.е. существенно выше, чем на контроле и с органической системой удобрения.

На вариантах с дефекатом по органическому фону и совместно с одинарной дозой минеральных удобрений содержание органофосфатов изменялось в пределах 18–449 мг/кг и 21–452 мг/кг, а среднее – 218 и 195 мг/кг соответственно.

Следует отметить, что в отличие от распределения по профилю минерального фосфора, органофосфаты характеризуются чрезвычайно неравномерным распределением, что наглядно иллюстрируют данные, приведенные на рисунке 24.

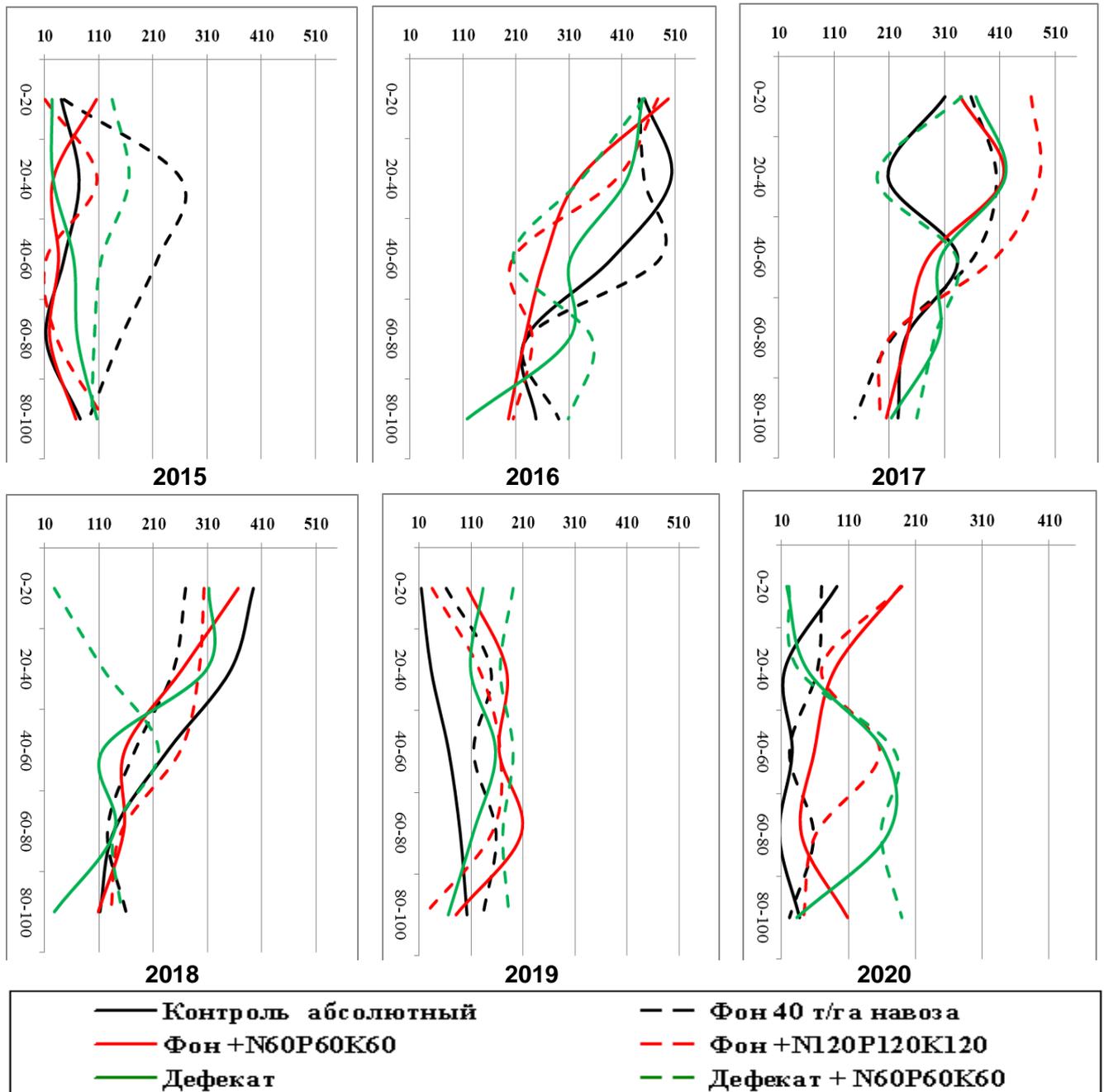


Рисунок 24 – Изменение содержания органического фосфора под влиянием систем удобрения и дефеката, мг/кг P_2O_5

Прежде всего, отметим, что дефицит осадков вегетационного периода 2015, 2019 и 2020 гг. обусловил низкое содержание органофосфатов. Профиль изучаемой почвы чрезвычайно сильно дифференцирован по содержанию органофосфатов. Как и следовало ожидать, максимальное количество органофосфатов накапливается в верхней 40 см толще. Однако в отдельные годы отмечается минимальное содержание органофосфатов в слое 0–20 см, как практически на всех вариан-

тах в 2015, 2019 и 2020 гг. Это обусловлено как малым количеством органических остатков и их ускоренной минерализацией и миграцией продуктов разложения в нижележащий слой вследствие избыточного увлажнения начала вегетационного периода. Тем не менее за период наблюдений на всех удобренных вариантах содержание органофосфатов превышало контроль на 140–300 мг/кг, что наглядно иллюстрируют данные рисунка 25.

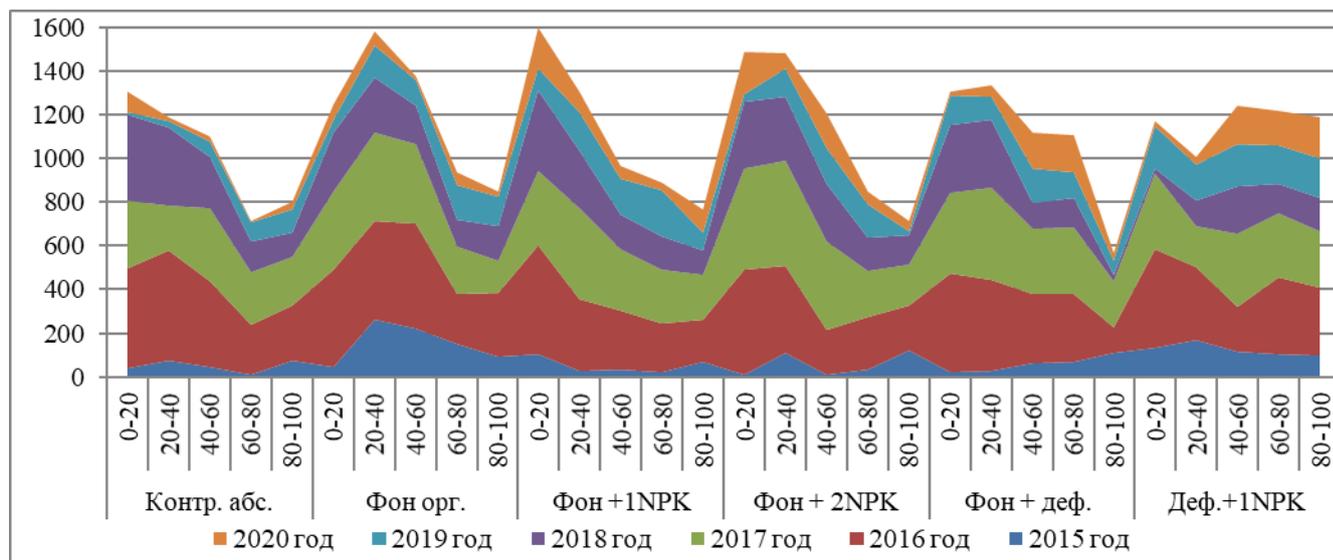


Рисунок 25 – Влияние систем удобрения и дефеката на содержание и характер распределения по профилю органофосфатов, мг/кг P_2O_5

Содержание органофосфатов на варианте с дефекатом по органическому фону несколько выше, чем на контроле, а на варианте с дефекатом совместно с одинарной дозой минеральных удобрений незначительно ниже. Отметим, что мы наблюдаем не прямое действие, а последствие дефеката.

Нами выполнена математическая обработка результатов по выявлению корреляции между содержанием органических фосфатов и гранулометрическими фракциями. Данные представлены в таблице 21 и на рисунке 26. Если сравнивать полученные результаты по органофосфатам с другими формами фосфора, есть общие закономерности, но есть и принципиальные различия. Нами получены данные, которые находятся в некотором противоречии со сложившимся в науке и практике мнением о максимальном закреплении органофосфатов тонкодисперсными фракциями почвы.

Таблица 21 – Коэффициенты корреляции (*r*) связи содержания органического фосфора с гранулометрическими фракциями

Фракции	1–0,25	0,25–0,05	0,05–0,01	0,01–0,005	0,005–0,001	< 0,001	< 0,01
Контроль, <i>r</i>							
2015 г.	0,179	–0,549	0,117	–0,320	0,746	0,180	0,232
2016 г.	0,830	–0,682	0,907	0,075	0,276	–0,610	–0,500
2017 г.	0,072	0,155	–0,298	0,803	0,293	–0,320	0,215
2018 г.	0,948	–0,740	0,746	0,388	0,118	–0,834	–0,683
2019 г.	–0,960	0,735	–0,774	–0,435	–0,055	0,881	0,727
2020 г.	0,699	–0,639	0,410	0,889	0,374	0,788	–0,245
Фракции	1–0,25	0,25–0,05	0,05–0,01	0,01–0,005	0,005–0,001	< 0,001	< 0,01
Фон органический, <i>r</i>							
2015 г.	0,189	0,811	–0,667	0,127	–0,172	0,066	0,057
2016 г.	0,726	0,271	–0,142	0,013	–0,031	–0,790	–0,363
2017 г.	0,762	0,246	–0,020	–0,360	–0,442	–0,773	–0,664
2018 г.	0,914	0,062	0,166	–0,230	–0,445	–0,993	–0,697
2019 г.	–0,808	0,584	–0,576	0,223	–0,089	0,705	0,425
2020 г.	0,600	–0,237	0,566	–0,820	–0,955	–0,524	–0,931
Фракции	1–0,25	0,25–0,05	0,05–0,01	0,01–0,005	0,005–0,001	< 0,001	< 0,01
Фон + N₆₀P₆₀K₆₀, <i>r</i>							
2015 г.	0,012	–0,021	–0,299	0,680	0,226	–0,681	0,531
2016 г.	–0,386	–0,052	–0,486	0,917	0,399	–0,138	0,984
2017 г.	–0,344	0,151	–0,715	0,569	0,322	0,350	0,772
2018 г.	–0,306	–0,058	–0,583	0,937	0,291	0,040	0,990
2019 г.	–0,250	–0,274	0,316	–0,315	–0,193	0,803	–0,128
2020 г.	0,019	0,196	–0,579	0,853	0,211	–0,482	0,729
Фракции	1–0,25	0,25–0,05	0,05–0,01	0,01–0,005	0,005–0,001	< 0,001	< 0,01
Фон + N₁₂₀P₁₂₀K₁₂₀, <i>r</i>							
2015 г.	–0,464	0,921	–0,892	–0,869	0,655	0,324	0,079
2016 г.	0,844	–0,445	0,300	0,599	–0,570	–0,966	–0,995
2017 г.	0,521	–0,549	0,518	0,546	–0,473	–0,770	–0,751
2018 г.	0,571	–0,613	0,574	0,614	–0,517	–0,796	–0,754
2019 г.	–0,473	–0,381	0,596	0,149	–0,434	0,333	0,261
2020 г.	0,700	–0,807	0,705	0,821	–0,443	–0,668	–0,401
Фракции	1–0,25	0,25–0,05	0,05–0,01	0,01–0,005	0,005–0,001	< 0,001	< 0,01
Фон + дефекат, <i>r</i>							
2015 г.	0,645	0,254	–0,392	–0,642	–0,703	0,424	–0,293
2016 г.	–0,766	–0,378	0,474	0,670	0,809	–0,269	0,466
2017 г.	–0,629	–0,143	0,327	0,427	0,562	–0,342	0,182
2018 г.	–0,521	–0,299	0,480	0,647	0,601	–0,523	0,183
2019 г.	–0,853	–0,158	0,012	0,446	0,872	0,233	0,747
2020 г.	–0,576	–0,135	–0,072	–0,327	0,288	0,963	0,657
Фракции	1–0,25	0,25–0,05	0,05–0,01	0,01–0,005	0,005–0,001	< 0,001	< 0,01
Дефекат + N₆₀P₆₀K₆₀, <i>r</i>							
2015 г.	0,515	–0,789	0,913	0,406	–0,551	0,610	–0,041
2016 г.	0,803	–0,043	0,326	–0,184	–0,043	–0,509	–0,687
2017 г.	0,226	–0,033	–0,249	–0,603	0,933	–0,673	0,490
2018 г.	–0,905	0,174	–0,424	0,237	0,024	0,432	0,595
2019 г.	0,299	0,012	–0,339	–0,860	0,954	–0,562	0,540
2020 г.	–0,849	0,659	–0,845	–0,115	0,300	–0,135	0,276

Известно, что общее содержание фосфора зависит в основном от накопления гумуса в почве, так как в нем его содержится почти в 10 раз больше, чем в почве в целом [157, 159]. По данным М.Н. Кузелева [94], при внесении в запас и ежегодном применении минеральных удобрений, как в богарных, так и в орошаемых условиях, отмечалась заметная оптимизация параметров, характеризующих фосфатное состояние черноземов обыкновенных Каменной Степи. Ежегодное применение минеральных удобрений на обыкновенных черноземах под конкретную культуру является более рациональным приемом оптимизации их фосфатного состояния, чем внесение фосфорных удобрений в запас для создания высокого уровня обеспеченности почвы этим элементом [94].

Проблема заключается в том, что почвенные фосфаты можно разделить на органические и минеральные лишь весьма условно, так как значительная их часть входит в состав комплексных органоминеральных соединений, имеющих различную прочность связи с минеральной матрицей почвы.

Минеральные фосфаты, которые содержатся в почве, имеют различную устойчивость, а также находятся в динамическом равновесии между собой. Они зависят от окружающих условий и постоянно изменяются, переходя из одной формы в другую. Данный процесс движется по направлению растворимости фосфатов, образуя термодинамически устойчивые образования нерастворимых в данных условиях соединений.

С какой скоростью почва будет поглощать фосфаты, напрямую зависит от минералогического и гранулометрического состава данной почвы. После внесения фосфорных удобрений большее количество фосфора сорбируется в почве относительно быстро, около 10–30 мин, однако полное равновесие наступает не так быстро, а в зависимости от условий спустя несколько месяцев [164]. С какой скоростью происходит сорбция фосфат-ионов во времени говорит о том, что есть многообразие сорбционных процессов в почве, которые происходят параллельно с различными скоростями. Быстро протекающие в почве реакции фосфат-ионов обусловлены хемосорбцией на поверхности почвенных коллоидов, а также их взаимодействием с поливалентными металлами почвенного раствора с образованием нерастворимых солей.

В почвах, за исключением песчаных, главенствуют химические процессы ретроградации фосфора вследствие образования нерастворимых фосфатов и хемосорбции фосфат-ионов снаружи глинистых минералов и аморфных пленок $Al(OH)_3$ и $Fe(OH)_3$.

Ретроградация фосфат-ионов в почвах представляет собой довольно сложный многоступенчатый процесс трансформации растворимых фосфатов в нерастворимые. Наукой доказано, что на первом этапе на суглинистых почвах около 65–80% от объема внесенных фосфорных удобрений адсорбируется на поверхности, а затем химически связывается 20–35%.

Значимым в теории и практики является выявление роли (долевого участия) разных фракций минеральных и органических фосфорсодержащих соединений почвы. Установление долевого участия отдельных фракций и соединений фосфора в питании растений является довольно сложной и трудной задачей. Для объяснения сложившейся ситуации следует обратиться к данным таблицы 22.

Таблица 22 – Распределение форм фосфора в зависимости от гранулометрического состава почв (по Джексону)

Размер частиц, мм	Фосфаты		
	алюминия и железа, %	кальция и магния, %	органические, %
> 0,2	13,0	60,0	23,9
0,06–0,20	13,7	44,6	22,7
0,02–0,06	27,9	29,6	32,5
0,06–0,002	31,3	12,3	42,9
0,002–0,006	29,6	18,7	34,7
< 0,002	21,0	12,7	33,5

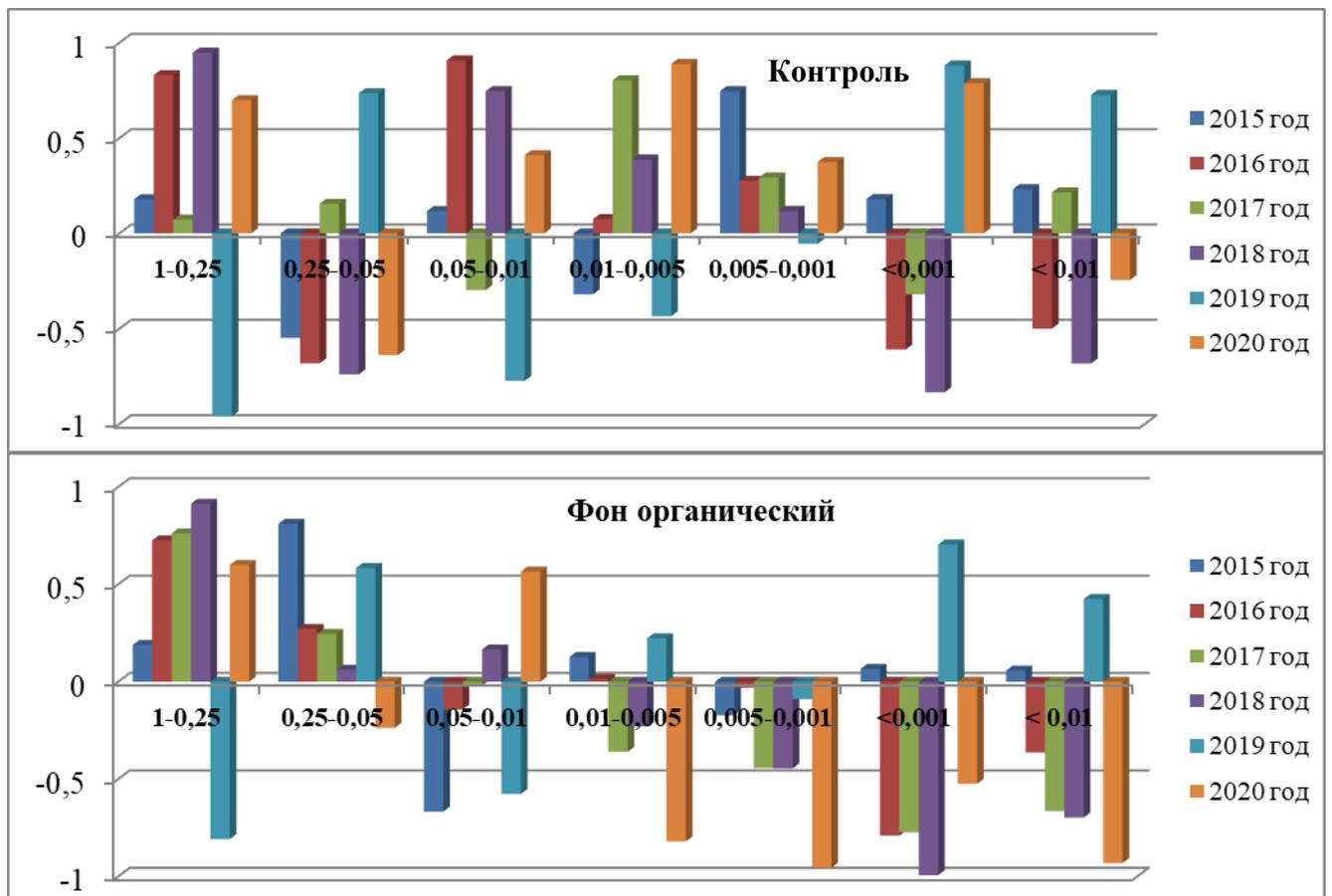
Как мы уже отметили выше, исследованиями показано, что основная доля органофосфатов закрепляется на тонкодисперсных фракциях, соответствующих средней и тонкой пали по российской классификации.

Анализ данных, представленных в таблице 22, показывает, что на вариантах контроля и органического фона связи содержания органофосфатов с фракциями средней и тонкой пыли нет или она слабая. На варианте органоминеральной си-

системы удобрения с одинарной дозой минеральных удобрений 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 органо-минеральной системы удобрения с одинарной дозой минеральных удобрений 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 с дефекатом по органическому фону 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 с дефекатом совместно с одинарной дозой минеральных удобрений связи органофосфатов с фракцией средней пыли нет или она слабая, а с тонкой пылью она варьирует от слабой до очень сильной – $r = 0,300-0,954$.

Наглядно данные математической обработки связи органофосфатов с granulometricкими фракциями представлены на рисунке 26.



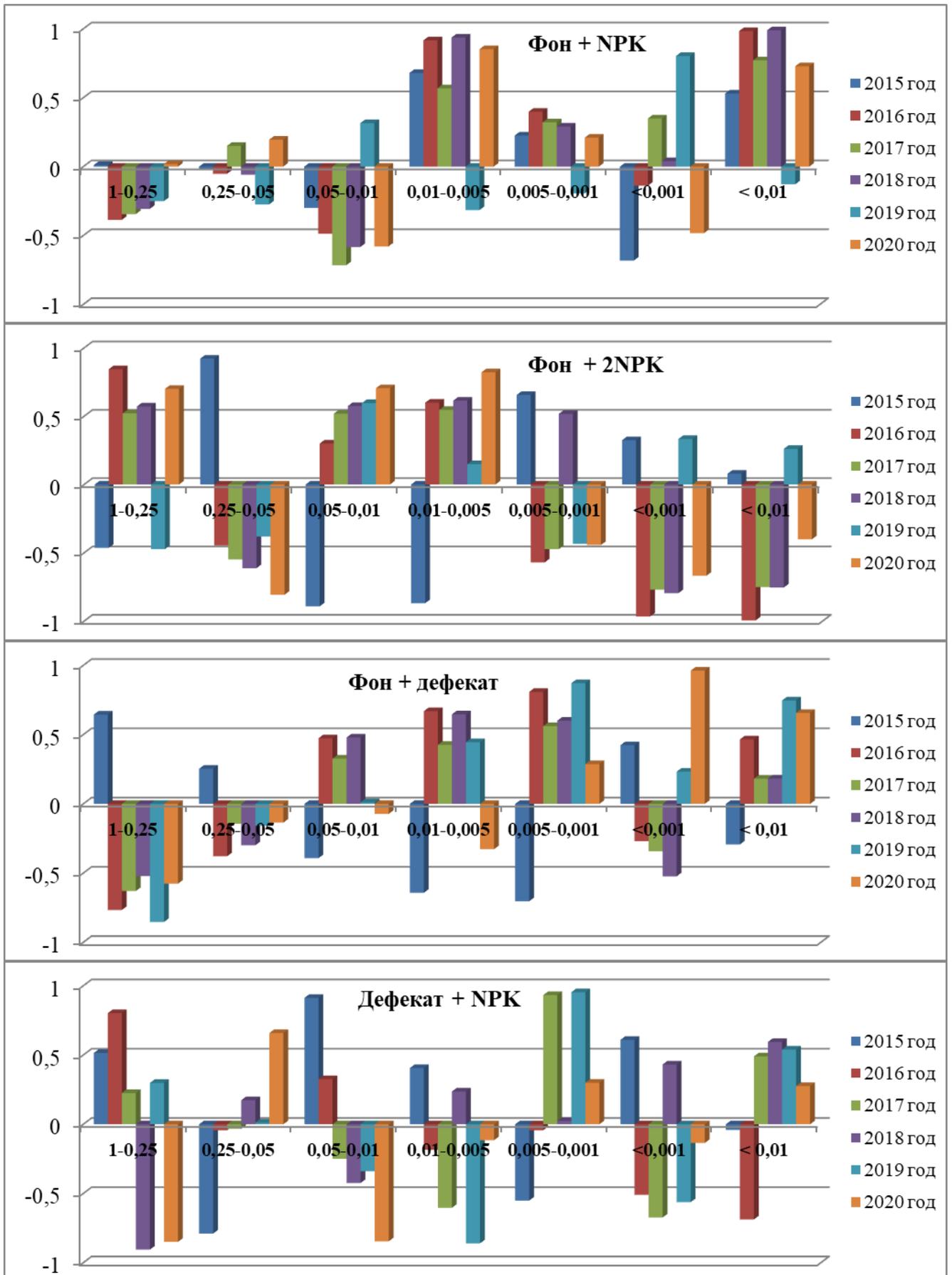


Рисунок 26 – Коэффициенты корреляции (r) связи содержания органического фосфора с гранулометрическими фракциями

Как следует из данных рисунка 26, наиболее значимые связи органофосфатов наблюдаются с фракцией крупного и среднего песка, пылеватыми фракциями, связи почти нет с фракцией ила, за исключением 2019 и 2020 гг. С фракцией физической глины связи органофосфатов практически нет. Совершенно уникальные закономерности наблюдаются на варианте органической системы удобрения. Корреляция содержания органофосфатов от средней до высокой выявлена только с фракцией крупного и среднего песка, с остальными фракциями она преимущественно отрицательная. На варианте органоминеральной системы удобрения с одинарной дозой минеральных удобрений связи органофосфатов с грубодисперсными фракциями не выявлено, зато она установлена на варианте с двойной дозой минеральных удобрений. На вариантах с дефекатом по органическому фону и с одинарной дозой минеральных удобрений связи неоднозначные. Если на варианте с дефекатом по органическому фону выявлена значимая связь органофосфатов с пылеватыми фракциями, то на варианте совместно с одинарной дозой эта связь отсутствует.

Как уже показано нами ранее, системы удобрения и дефекаат способствуют повышению содержания всех форм фосфора. Однако нельзя исключать и влияние возделываемых с.-х. культур, которые имеют различную способность усваивать фосфор из почвы и удобрений, они имеют неодинаково развитую корневую систему, что оказывает влияние на содержание и характер распределения органофосфатов по профилю. Влияют они и на особенности взаимодействия органофосфатов с минеральной частью почвы. Для устранения влияния с.-х. культур на характер связи органофосфатов с гранулометрическими фракциями изучаемой почвы мы выбрали максимальные значения коэффициентов корреляции за 2017 г., т.е. паровое поле. На контроле максимальный коэффициент корреляции выявлен с фракцией средней пыли – $r = 0,803$. На варианте органической системы удобрения эта связь установлена с фракцией крупного и среднего песка – $r = 0,762$. Столь же высокий уровень связи органофосфатов установлен на варианте органоминеральной системы удобрения с одинарной дозой минеральных удобрений с фракцией физической глины – $r = 0,772$. На варианте с двойной дозой минеральных удобрений максимальная связь органофосфатов выявлена с фракцией средней пыли –

$r = 0,564$ [165]. На вариантах с дефектатом максимальная связь органофосфатов выявлена с фракцией средней пыли – $r = 0,562$ и $r = 0,933$ соответственно.

Для более полного представления о влиянии систем удобрения и дефектата на содержание различных форм фосфора и закономерностей накопления и характера распределения различных форм фосфора по профилю изучаемой почвы проанализируем данные таблицы 23.

Таблица 23 – Формы фосфора по методу Сендерса-Вильямса (P_2O_5 , мг/кг)

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

Примечание: общ – общий, мин – минеральный и орг – органический фосфор

Как уже было установлено нами, изменение содержания различных форм фосфора под влиянием систем удобрения и дефеката весьма динамично во времени и пространстве. На накопление различных форм фосфора оказывают влияние гидротермические условия активного вегетационного периода. Дефицит увлажнения обуславливает накопление преимущественно минеральных форм, а нормальное или близкое к нему увлажнение способствует накоплению органофосфатов.

Анализ данных таблицы 23 показывает, что по годам проведения исследования наблюдаются не только значительные колебания содержания всех форм фосфора, но изменяется и их соотношение как в пахотном слое, так и по всему профилю. Как мы уже показали выше, все формы фосфора в изучаемой почве достаточно динамичны, что является откликом как на внесение удобрений и дефеката, так и на гидротермические условия вегетационного периода. Гидротермические условия вегетационных периодов были неодинаковыми, что подтверждается анализом климатических условий за годы проведения исследований. В 2015 г. весна была влажной (см. Рисунок 6), однако середина и конец активного вегетационного периода был засушливым, что сказалось на развитии вико-овсяной смеси. Для этого года условия накопления всех форм фосфора оказались неблагоприятными, минеральный фосфор накапливался несколько более интенсивно, в сравнении с органофосфатами, особенно на варианте органоминеральной системы удобрения с двойной дозой минеральных удобрений. Считаем, что эта закономерность достаточно убедительно подтверждают данные, представленные на рисунках 27–32.

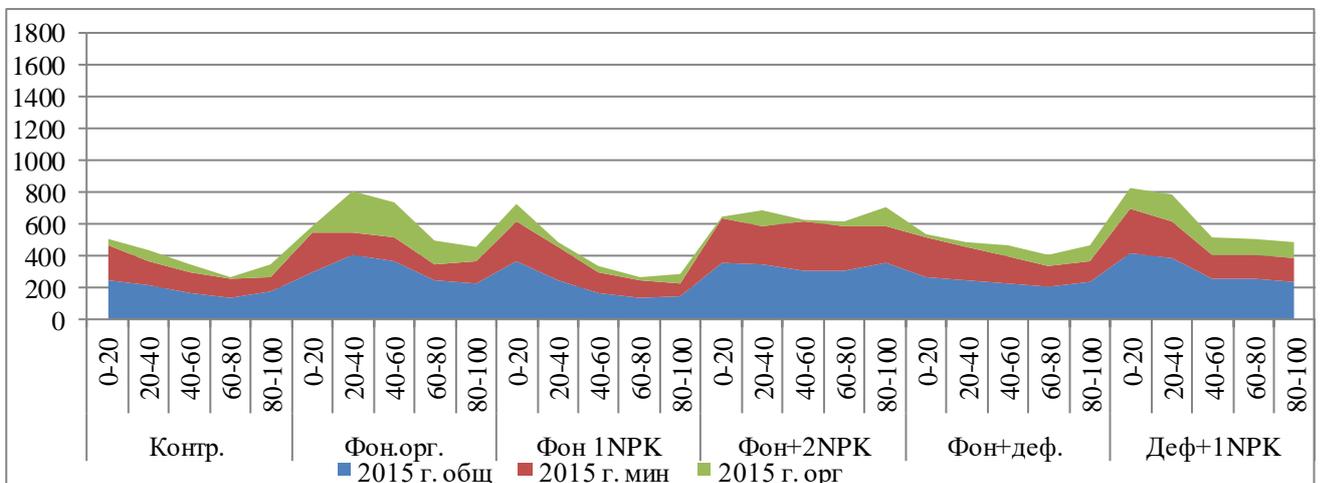


Рисунок 27 – Влияние систем удобрения и дефеката на содержание различных форм фосфора (2015 г.)

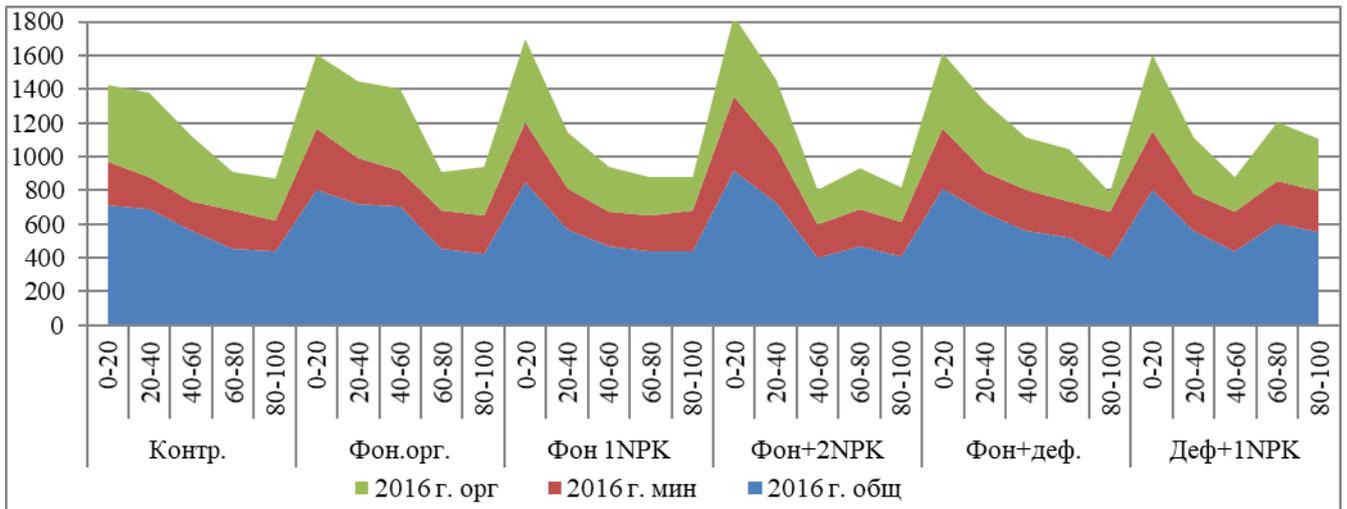


Рисунок 28 – Влияние систем удобрения и дефеката на содержание различных форм фосфора (2016 г.)

Более благоприятные условия увлажнения 2016 г. (см. Рисунок б) обусловили накопление всех форм фосфора, но преимущественно больше органофосфатов, что наглядно показано на рисунке 29. Их аккумуляция наблюдалась на всех вариантах опыта, но удобренные варианты и варианты с дефекатом имели явное преимущество перед контролем. При этом следует помнить, что и культуры, выращиваемые в опыте, оказывают влияние не только на накопление, но на характер распределения органофосфатов по профилю.

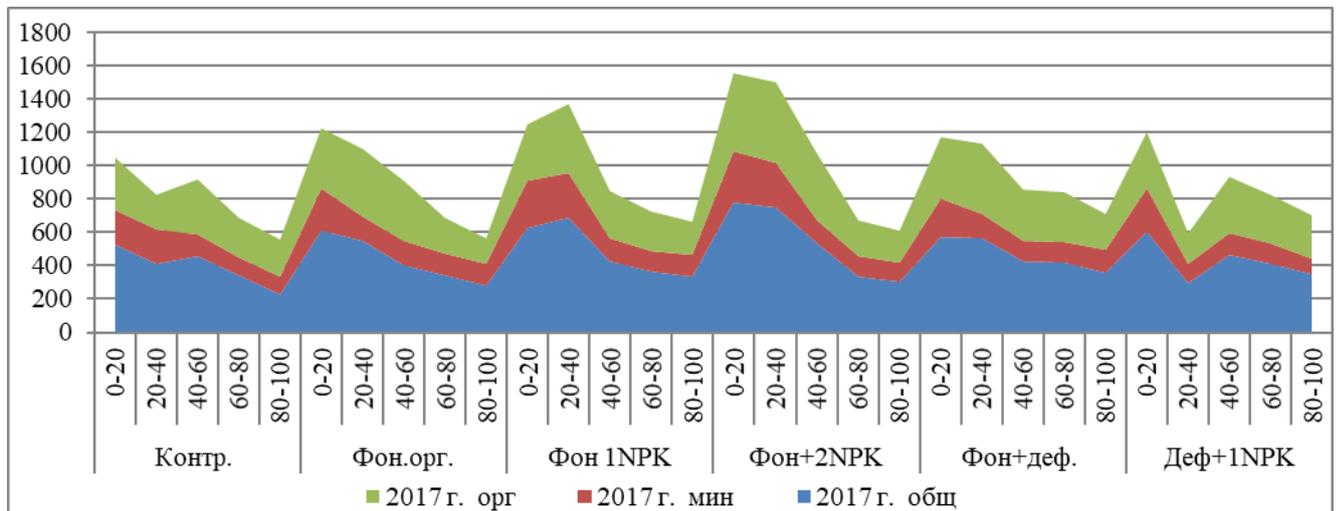


Рисунок 29 – Влияние систем удобрения и дефеката на содержание различных форм фосфора (2017 г.)

Гидротермические условия вегетационного периода были наиболее благоприятными за весь период наблюдений (см. Рисунок б), если не считать недостатком избыточное увлажнение весеннего периода, что существенно осложнило про-

ведение полевых работ, в т. ч. посев с.-х. культур. Весна наступила значительно позже, что напрямую отразилось на развитии растений. В отличие от 2016 г., когда было отмечено высокое содержание форм фосфора, 2017 г. показал более низкое содержание этих форм фосфора, но если сравнить с остальными годами, то оно оказалось относительно высоким. Накопление органофосфатов преобладало над накоплением минерального фосфора. Ведь содержание органофосфатов в значительной степени обусловлено развитием корневых систем с.-х. культур, а в 2017 г. поле паровало, что способствовало ускоренному разложению органических остатков и их минерализации и/или гумификации.

В 2018 г. условия вегетационного периода были менее благоприятными (см. Рисунок 6), что сказалось на накоплении меньшего количества общего фосфора по сравнению с 2017 г. (Рисунок 30). Тем не менее, практически на всех вариантах опыта органофосфаты преобладали над минеральным фосфором. Более активно, чем на контроле накопление всех форм фосфора протекало только на вариантах органоминеральной системы.

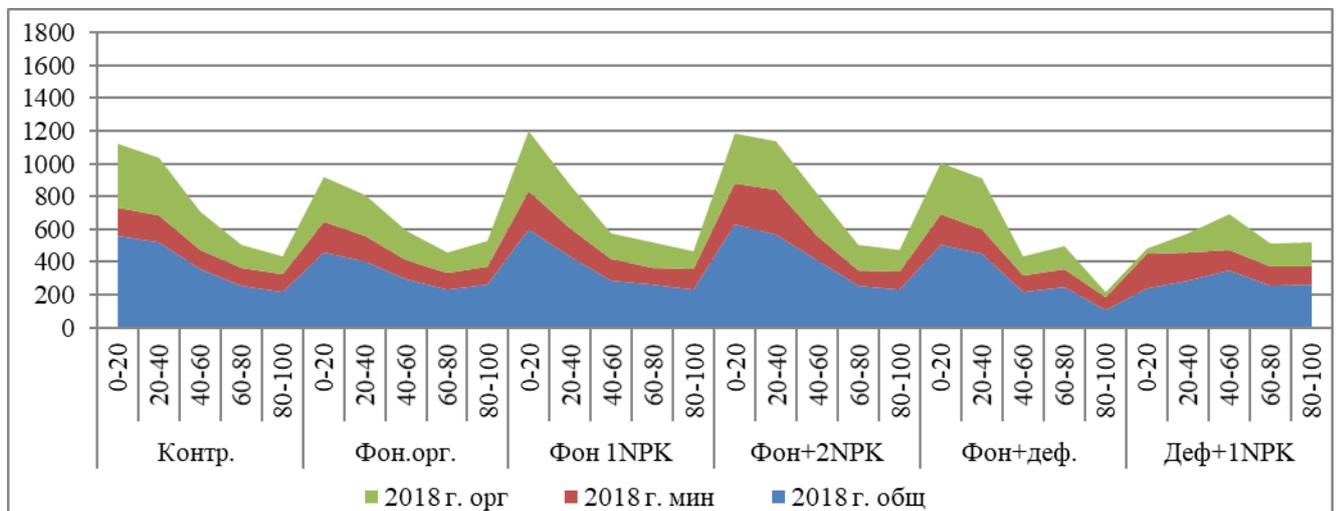


Рисунок 30 – Влияние систем удобрения и дефека на содержание различных форм фосфора (2018 г.)

Вегетационный период 2019 г. оказался очень контрастным по гидротермическим условиям (см. Рисунок 6). Избыточное увлажнение начала вегетационного периода сменилось устойчивой засухой в июне, затем избыточным увлажнением в июле, после которого опять имела место засуха, что сказалось на развитии сахарной свеклы (Рисунок 31).

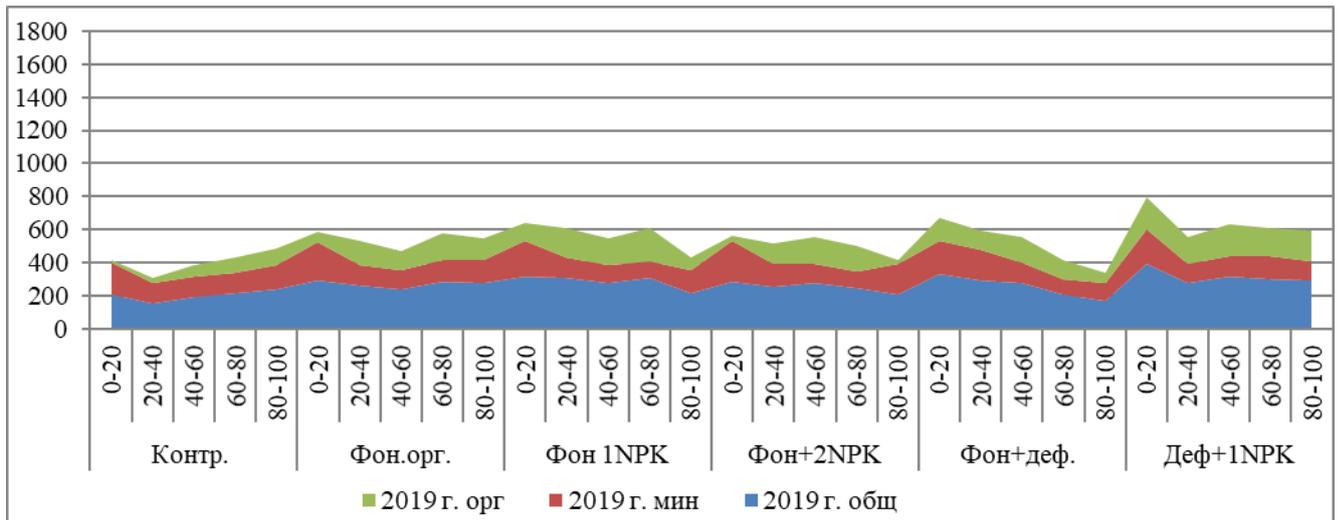


Рисунок 31 – Влияние систем удобрения и дефеката на содержание различных форм фосфора (2019 г.)

Следует отметить и то, что после сахарной свеклы остается мало послеуборочных и корневых остатков. С учетом высокого выноса элементов питания этой культурой, следовало ожидать, что накопление различных форм фосфора будет незначительным. Таковым оно оказалось и по нашим данным. Особенностью являлось относительное преобладание минеральной формы фосфора в пахотном слое, а в нижележащих слоях органофосфатов. Тем не менее на всех удобренных вариантах и с дефекатом накапливалось больше фосфора, чем на контроле (Рисунок 32).

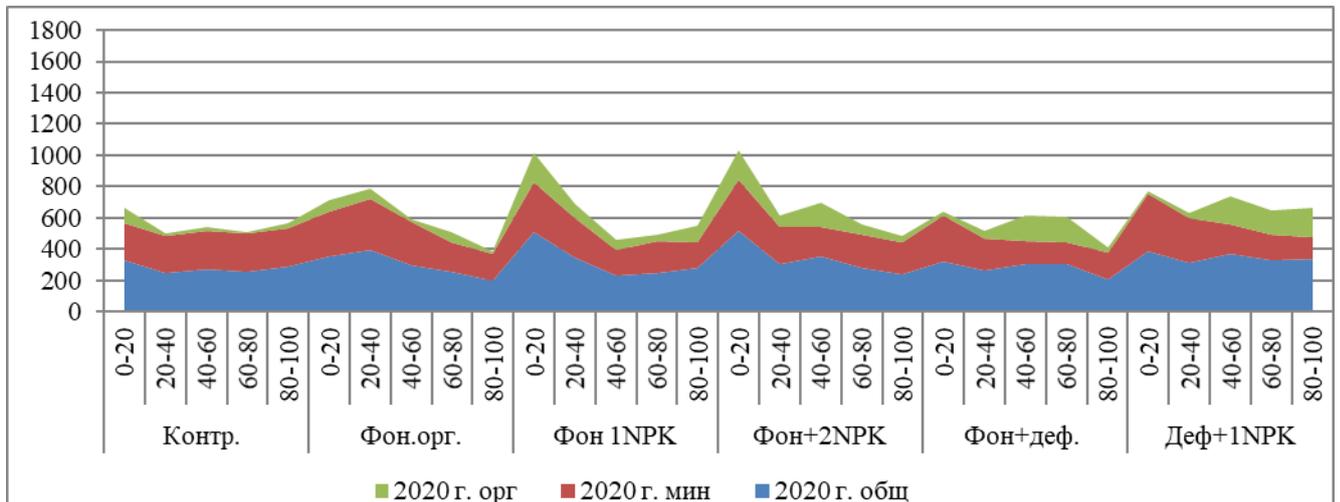


Рисунок 32 – Влияние систем удобрения и дефеката на содержание различных форм фосфора (2020 г.)

Самые неблагоприятные условия вегетационного периода сложились в 2020 г. (см. Рисунок 6), когда после избыточно влажной весны установилась устойчивая засуха продолжительностью более трех месяцев. Как следует из данных рисунка 33,

в составе общего фосфора в 2020 г. преобладала его минеральная форма. На удобренных вариантах содержание всех форм фосфора было существенно выше, чем на контроле, особенно на вариантах органоминеральной системы удобрения. На варианте с дефекатом по органическому фону содержание минерального фосфора было выше, чем на контроле, а в нижней части профиля преобладали оргонофосфаты. На варианте с дефекатом совместно с одинарной дозой минеральных удобрений содержание всех форм фосфора было выше, чем на контроле, а в нижней части профиля преобладали оргонофосфаты. При резких колебаниях влажности почвы увеличивается содержание труднорастворимых форм фосфора, и, напротив, при благоприятных условиях увлажнения наблюдается увеличение содержания подвижных форм фосфора [9].

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 оргонофосфаты.

4.2 Влияние удобрений и дефеката на экстрагируемость фосфатов

Важным вопросом при исследовании режима фосфора в почве является его доступность растениям. Если азот в нитратах и сера в сульфатах, которые восстанавливаются в растениях, являются более доступными растениям, то фосфор, поглощенный из почвы, остается в окисленном состоянии и встречается как в органической, так и в минеральной формах как центральный атом фосфатной группы и поэтому малодоступен растениям. В растениях все формы фосфора можно определить как запасные и структурные соединения и как продукты промежуточного обмена. Запасные и структурные соединения представлены фитином, фосфолипидами и нуклеиновыми кислотами. В семенах фосфор откладывается преимущественно в виде фитина – кальциево-магниевой соли инозитгексафосфорной кислоты. При прорастании семян фитин подвергается ферментативному гидролизу, в результате которого фосфор переводится в минеральную форму и может быть использован развивающимся проростком.

Внешние симптомы фосфорного голодания растений проявляются в синевато-зеленой окраске листьев, нередко с пурпурным или бронзовым оттенком. Часто листья мельчают и развиваются более узкими, их края загибаются кверху. Окраска их темнее, чем у нормально питающихся фосфором растений. При недостатке фосфора приостанавливается рост сельскохозяйственных культур, задерживается созревание урожая. От фосфорного голодания больше страдают более старые листья – нижние листья [1].

Особенно чувствительны к недостатку фосфора растения в начальных фазах роста и развития, когда их корневая система обладает слабой усвояющей способностью. В начальные стадии развития сельскохозяйственные культуры интенсивнее поглощают фосфаты, чем в последующие периоды роста. Оптимальное фосфорное питание в начальный период роста и развития растений способствует развитию корневой системы – она лучше проникает в почву и лучше ветвится, что улучшает снабжение растений влагой и питательными элементами. Фосфор способствует более экономному расходу влаги, что имеет большое значение в засушливые периоды.

Избыток фосфора ведет к плохому использованию его растениями, так как в этом случае много фосфатов находится в минеральной форме, особенно в вегетативных органах (в семенах до 90% фосфатов бывает в органических соединениях). При избытке фосфора растения созревают преждевременно, не успев синтезировать хороший урожай. Фосфора в растениях содержится гораздо больше в товарной продукции, чем в нетоварной массе, представленной вегетативными органами, при этом абсолютный вынос фосфора товарной частью урожая всегда выше, чем нетоварной [1].

В практике агрохимической службы определяют содержание подвижного фосфора, для чего используются различные экстрагенты при разном соотношении почва : экстрагент и разной экспозиции [103]. Определенные разными методами результаты могут быть несопоставимыми. Между тем растениям наиболее доступны органофосфаты. Это своего рода пролонгированный источник доступного фосфора, так как для разложения растительных остатков требуется время. Они-то,

как правило, не определяются. Содержание органофосфатов очень динамично во времени и пространстве и зависит от количества органики.

Подвижный фосфор определяется различными методами: Олсена, Брейя-Куртца, Кирсанова, Мачигина, Чирикова и др. В наших исследованиях использовали методы определения Чирикова и Брейя-Куртца. По этим методам извлекаются подвижные формы фосфора, поэтому их сравнение вполне корректно.

Таблица 24 – Влияние систем применения удобрения и дефеката на содержание подвижного фосфора по Чирикову, мг/кг P_2O_5

Варианты опыта	Слой, см	Годы					
		2015	2016	2017	2018	2019	2020
Контроль	0–20	153	102	143	143	162	172
	20–40	121	88	157	126	88	138
	40–60	145	100	86	160	72	88
	60–80	93	84	121	107	57	107
	80–100	122	71	112	84	69	112
Фон органический	0–20	250	109	133	133	140	121
	20–40	317	98	100	128	79	119
	40–60	126	102	100	78	93	96
	60–80	193	71	86	86	91	109
	80–100	159	71	88	109	57	102
Фон + 1NPK	0–20	268	122	155	189	95	160
	20–40	209	81	138	105	115	103
	40–60	146	69	164	72	102	84
	60–80	105	60	112	69	55	62
	80–100	41	103	131	26	81	121
Фон + 2NPK	0–20	191	164	274	194	145	191
	20–40	226	91	200	239	107	107
	40–60	194	81	159	136	112	91
	60–80	160	69	193	81	122	90
	80–100	193	76	114	93	67	79
Фон + дефекат	0–20	162	148	213	150	153	138
	20–40	134	115	128	231	141	157
	40–60	90	86	150	114	133	90
	60–80	96	148	93	90	141	129
	80–100	110	129	146	78	148	78
Дефекат + 1NPK	0–20	187	150	112	193	131	165
	20–40	155	96	83	131	79	155
	40–60	91	193	79	126	81	93
	60–80	88	96	103	117	84	84
	80–100	91	134	59	74	129	95
НСП ₀₅		49,29					

Как следует из данных, представленных в таблице 24, содержание подвижного фосфора по годам наблюдений сильно различается. В пахотном слое контрольного варианта содержание подвижного фосфора изменяется в пределах 102–172 мг/кг, при среднем содержании 146 мг/кг.

На варианте органической системы удобрения содержание подвижного фосфора изменяется в пределах 109–250 мг/кг, при среднем его содержании 148 мг/кг. При варьировании в более широких пределах на этом варианте среднее содержание подвижного фосфора практически сравнимо с таковым на контроле, что связано с большим выносом фосфора на этом варианте.

На вариантах органоминеральной системы удобрения с одинарной и двойной дозой минеральных удобрений содержание подвижного фосфора изменяется в пределах 95–268 и 145–274 мг/кг при среднем содержании 165 и 193 мг/кг соответственно. Можно сделать вывод, что органоминеральная система удобрения не только повышает урожаи выращиваемых сельскохозяйственных культур, но и обеспечивает более высокое содержание подвижного фосфора в пахотном слое изучаемой почвы.

На вариантах применения дефеката по органическому фону и с одинарной дозой минеральных удобрений содержание подвижного фосфора в пахотном слое изменяется в пределах 138–213 и 112–193 мг/кг при среднем содержании 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.

На основании полученных нами данных можно отметить, что самое высокое содержание подвижного фосфора наблюдалось в 2015 и 2017 гг., а минимальное – в 2019 г. под культурой сахарной свеклы, что обусловлено его высоким выносом данной культурой. Обратим внимание на то, что высокое содержание подвижного фосфора обнаруживается не только в пахотном слое, но и в ниже лежащих горизонтах, преимущественно в гумусовом горизонте. Но и в переходных горизонтах отмечено достаточно высокое содержание подвижного фосфора, которое может достигать 103–193 мг/кг.

Таким образом, сложившееся в науке и практике мнение о малой подвижности соединений фосфора по профилю не подтверждается полученными нами результатами. Зато это хорошо согласуется с мнением многих ученых, доказывающих, что систематическое применение фосфорных удобрений приводит не просто к общему обогащению почв фосфатами, но и повышению доли их легкоподвижных фракций [39, 45, 47, 53, 62, 68, 72, 81, 85, 90, 110, 114, 127, 145, 149, 164, 170, 172]. Характер распределения подвижного фосфора по профилю наглядно иллюстрирует рисунок 33.

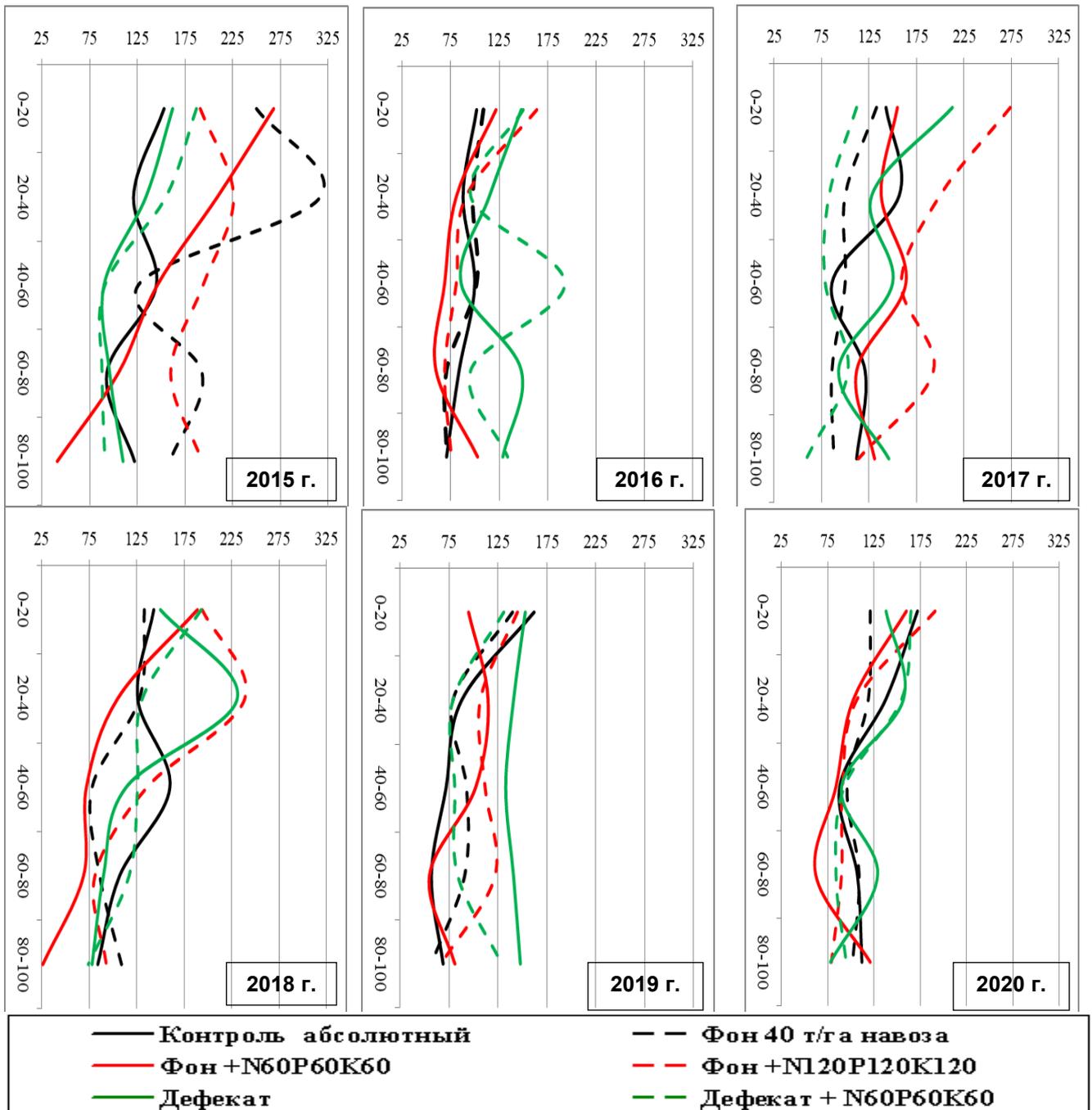


Рисунок 33 – Влияние систем применения удобрения и дефеката на содержание и характер распределения по профилю подвижного фосфора по Чирикову, мг/кг P_2O_5

Влияние систем удобрения на подвижность фосфатов выявляется и по полученным нами данным. Это проявляется, прежде всего, в содержании подвижного фосфора и в характере его распределения по профилю изучаемой почвы. Как следует из анализа данных таблицы 24 и рисунка 33, подвижный фосфор чрезвычайно неравномерно распределяется по профилю изучаемой почвы. Общей закономерностью является преобладание аккумулятивно-элювиально-иллювиального типа распределения подвижного фосфора по профилю. И если повышенное содержание подвижного фосфора в слоях почвы 0–20 и 20–40 см вполне ожидаемо и понятно, ведь оно возрастает за счет внесения удобрений, то рост его содержания в нижней части профиля обусловлен нисходящей миграцией легко подвижных фракций и их аккумуляцией под влиянием карбонатов, выполняющих роль геохимического барьера в слое 80–100 см. Наиболее наглядно это проявляется в годы с дефицитом осадков (2019–2020 гг.). 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 контрольном варианте.

Как установил В.Д. Муха [109], 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 ($КСПр = P_{подв}/P_{общ} \times 100$). Приводим результаты расчетов величины КСПр в таблице 25.

Как следует из данных таблицы 25, величина КСПр по вариантам опыта варьирует в очень широком диапазоне. Так, в пахотном слое контрольного варианта она находится в пределах 14,3–78,3, или в среднем 30,5.

Таблица 25 – Подвижность фосфора под влиянием удобрений и дефеката

Варианты опыта	Слой, см	Годы																	
		2015			2016			2017			2018			2019			2020		
		общ	подв	КСПр															
Контроль	0–20	252	153	60,7	712	102	14,3	522	143	27,4	562	143	25,4	207	162	78,3	330	172	52,1
	20–40	220	121	55,0	690	88	12,7	413	157	38,0	518	126	24,3	155	88	56,8	250	138	55,2
	40–60	172	145	84,3	562	100	17,8	460	86	18,7	355	160	45,1	191	72	37,7	272	88	32,3
	60–80	134	93	69,4	456	84	18,4	343	121	35,3	252	107	42,5	215	57	26,5	255	107	42,0
	80–100	174	122	70,1	435	71	16,3	228	112	49,1	217	84	38,7	243	69	28,4	283	112	39,6
Фон органический	0–20	296	250	84,5	804	109	13,6	610	133	21,8	459	133	29,0	293	140	47,8	355	121	34,1
	20–40	404	317	78,5	722	98	13,6	550	100	18,2	405	128	31,6	267	79	29,6	394	119	30,2
	40–60	367	126	34,3	700	102	14,6	404	100	24,7	294	78	26,5	237	93	39,2	296	96	32,4
	60–80	250	193	77,2	456	71	15,6	342	86	25,1	231	86	37,2	289	91	31,5	252	109	43,2
	80–100	228	159	69,7	419	71	16,9	281	88	31,3	265	109	41,1	276	57	20,6	194	102	52,6
Фон + 1NPK	0–20	363	268	72,2	850	122	14,3	624	155	24,8	602	189	31,4	320	95	29,7	506	160	31,6
	20–40	244	209	85,7	570	81	14,2	684	138	20,2	435	105	24,1	307	115	37,5	344	103	29,9
	40–60	169	146	86,4	469	69	14,7	427	164	38,4	289	72	24,9	276	102	37,0	228	84	36,8
	60–80	134	105	78,4	438	60	13,7	363	112	30,8	259	69	26,6	307	55	17,9	244	62	25,4
	80–100	146	41	28,1	440	103	23,4	333	131	39,3	233	26	11,2	217	81	37,3	276	121	43,8
Фон + 2NPK	0–20	357	191	53,5	916	164	17,9	776	274	35,3	634	194	30,6	283	145	51,2	516	191	36,8
	20–40	346	226	65,3	726	91	12,5	750	200	26,7	569	239	42,0	259	107	41,3	307	107	34,8
	40–60	313	194	62,0	402	81	20,1	536	159	29,7	409	136	33,2	280	112	40,0	350	91	26,0
	60–80	309	160	51,8	465	69	14,7	335	193	57,6	252	81	32,1	250	122	48,8	278	90	32,4
	80–100	355	193	54,4	410	76	18,5	304	114	37,5	235	93	39,6	207	67	32,4	241	79	32,8
Фон + дефекаг	0–20	270	162	60,0	806	148	18,4	570	213	37,4	502	150	29,8	335	153	45,7	318	138	43,4
	20–40	244	134	54,9	664	115	17,3	566	128	22,6	454	231	50,9	296	141	47,6	259	157	60,6
	40–60	233	90	38,6	556	86	15,5	427	150	35,1	217	114	52,5	278	133	47,8	307	90	29,3
	60–80	204	96	47,1	522	148	28,3	421	93	22,1	248	90	36,3	209	141	67,5	305	129	42,3
	80–100	235	110	46,8	394	129	32,7	355	146	41,1	107	78	72,9	171	148	86,5	204	78	38,2
Дефекаг + 1NPK	0–20	415	187	45,1	802	150	18,7	600	112	18,7	241	193	80,1	396	131	33,1	386	165	42,7
	20–40	392	155	39,5	558	96	17,2	298	83	27,8	289	131	45,3	280	79	28,2	315	155	49,2
	40–60	261	91	34,9	438	193	44,1	465	79	17,0	348	126	37,1	315	81	25,7	367	93	25,3
	60–80	254	88	34,6	604	96	15,9	413	103	24,9	257	117	45,5	305	84	27,5	324	84	25,9
	80–100	243	91	37,4	552	134	24,3	350	59	16,9	261	74	28,3	298	129	43,3	333	95	28,5

На варианте органической системы удобрения величина КСПр находилась в пределах 13,6–84,5, в среднем – 38,5, на вариантах органоминеральной системы удобрения с одинарной и двойной дозой минеральных удобрений – в пределах

14,3–72,2 и 17,9–53,5 соответственно, в среднем – 34,0 и 37,5, на вариантах с дефекатом по органическому фону и с одинарной дозой минеральных удобрений – 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 34.

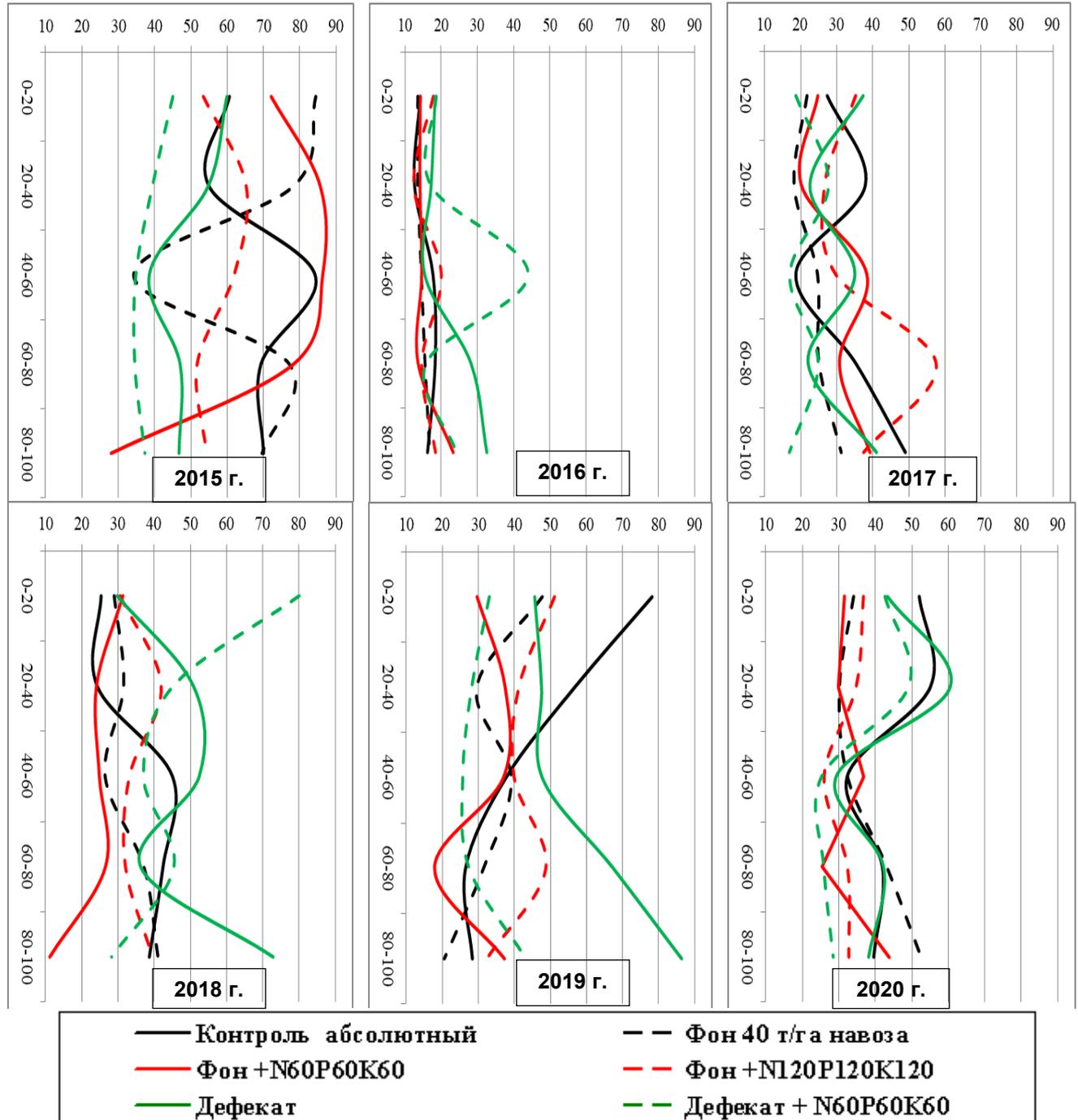


Рисунок 34 – Влияние систем удобрения и дефеката на величину КСПр

Как следует из данных таблицы 25 и рисунка 34 величина КСПр за годы наблюдений была неодинаковой под различными с.-х. культурами. Величина КСПр была максимальной в 2015 г. под озимой пшеницей на вариантах контроля, органической и органоминеральной систем удобрений с одинарной дозой минеральных удобрений. Остальные варианты опыта были или близки к контролю, или ниже (варианты с дефекатом). Минимальной величина КСПр была под ячменем, при этом только на вариантах органоминеральной системы удобрения с двойной дозой минеральных удобрений и с дефекатом она была выше, чем на контроле. Следует отметить, что в слое 0–40 см контрольного варианта величина КСПр была в 2019 и 2020 гг. выше, чем на вариантах с дефекатом. Распределение величины КСПр по профилю соответствует преимущественно элювиально-иллювиальному типу.

Нами выполнены исследования по выявлению влияния систем применения удобрения и дефеката на содержание и характер распределения по профилю обменных и подвижных форм фосфора по методу Брейя и Куртца. Данные представлены в таблицах 26, 27 и рисунках 31, 32. Из полученных нами данных следует, что содержание обменных и подвижных форм фосфора чрезвычайно сильно варьирует как по годам наблюдений, так и по вариантам опыта.

На контроле в пахотном слое содержание обменных и подвижных форм фосфора изменялось в пределах 246–590 мг/кг, при среднем значении за наблюдаемый период 352 мг/кг.

На варианте органической системы удобрения 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 контроле.

На вариантах органоминеральной системы удобрения с одинарной и двойной дозой минеральных удобрений 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, данная система удобрения не только существенно повышала урожай с.-х. культур, но одновременно резко повысила содержание обменных и подвижных форм фосфора.

Таблица 26 – Влияние систем применения удобрения и дефеката на содержание и характер распределения по профилю обменных и подвижных форм фосфора по методу Брейя и Куртца, мг/кг P₂O₅

Варианты опыта	Слой, см	Годы					
		2015	2016	2017	2018	2019	2020
Контроль	0–20	246	259	250	322	590	444
	20–40	129	165	105	217	171	109
	40–60	102	91	86	102	145	78
	60–80	103	62	64	59	117	74
	80–100	84	48	72	43	110	84
Фон органический	0–20	191	302	357	337	548	150
	20–40	570	261	153	191	160	328
	40–60	90	131	72	69	164	215
	60–80	119	71	57	48	145	60
	80–100	84	52	74	60	160	84
Фон + 1NPK	0–20	315	485	388	548	378	511
	20–40	204	297	260	390	159	239
	40–60	112	60	98	84	152	128
	60–80	95	40	55	48	141	52
	80–100	67	62	72	103	115	90
Фон + 2NPK	0–20	302	678	620	676	692	706
	20–40	289	269	404	698	171	259
	40–60	129	76	121	145	155	119
	60–80	226	78	107	67	119	107
	80–100	252	50	65	43	126	46
Фон + дефекат	0–20	224	331	370	394	368	350
	20–40	202	224	169	248	415	252
	40–60	98	43	84	67	233	60
	60–80	88	74	86	52	165	50
	80–100	84	45	152	53	107	60
Дефекат + 1NPK	0–20	222	411	396	363	413	502
	20–40	172	220	119	209	169	248
	40–60	90	103	91	164	141	103
	60–80	78	84	74	67	143	53
	80–100	74	67	78	57	133	57
НСР ₀₅		93,72					

На вариантах с дефекатом по органическому фону и с одинарной дозой минеральных удобрений 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 контроле.

Обратим внимание и на то, что на вариантах с дефекатом в слое 40–60 см содержание обменных и подвижных форм фосфора резко снижается, в то время как на остальных вариантах это снижение менее значительно. В чем причина подобной закономерности? Считаем, что это обусловлено иной физико-химической обстановкой на вариантах с дефекатом. Как уже было показано выше, на вариантах с дефекатом все виды кислотности существенно ниже, чем на остальных вариантах опыта. Вторая причина заключается в особенности взаимодействия используемого в этом методе экстрагента – NH_4F с почвой. Фтор – химически активный элемент и хороший комплексообразователь. Ион аммония активно вытесняет из поглощающего комплекса все катионы, в том числе кальций и магний. Фтор с ними активно взаимодействует – продуктом реакции является флюорит CaF_2 , который выпадает в осадок, он хорошо виден на стенках колб. Но еще более активно фтор взаимодействует со свободным кальцием миграционных форм карбонатов. На их присутствие указывают величины рН в нижележащих слоях изучаемой почвы. При рН стандартной водной вытяжки 7,2–7,3 почва начинает вскипать. А подобные величины рН в опыте наблюдались на вариантах с дефекатом в нижних слоях профиля практически ежегодно, а на остальных вариантах опыта в 2018 и 2019 гг. Содержание карбонатов при этом достигало 0,3%.

Для проверки возможности снижения экстрагируемости обменных и подвижных форм фосфора в присутствии свободного кальция миграционных форм карбонатов мы выполнили следующий опыт. Взяли 2 навески из пахотного слоя контрольного варианта, в одну из них добавили CaCO_3 в количестве, соответствующем 0,3% содержания. Выполнили экстрагирование и определили содержание обменных и подвижных форм фосфора в этих образцах. В образце без добавления CaCO_3 их содержание было 355 мг/кг, а в образце с добавлением CaCO_3 – 310 мг/кг. Считаем, что это подтверждает наш вывод о взаимодействии экстрагента с миграционными формами кальция, что и объясняет резкое снижение экстрагирования обменных и подвижных форм фосфора в нижней части профиля. В верхней части профиля, где максимальная величина гидролитической кислотности, извлекается максимальное количество обменного и подвижного фосфора.

Особенности распределения по профилю обменных и подвижных форм фосфора представлены на рисунке 35.

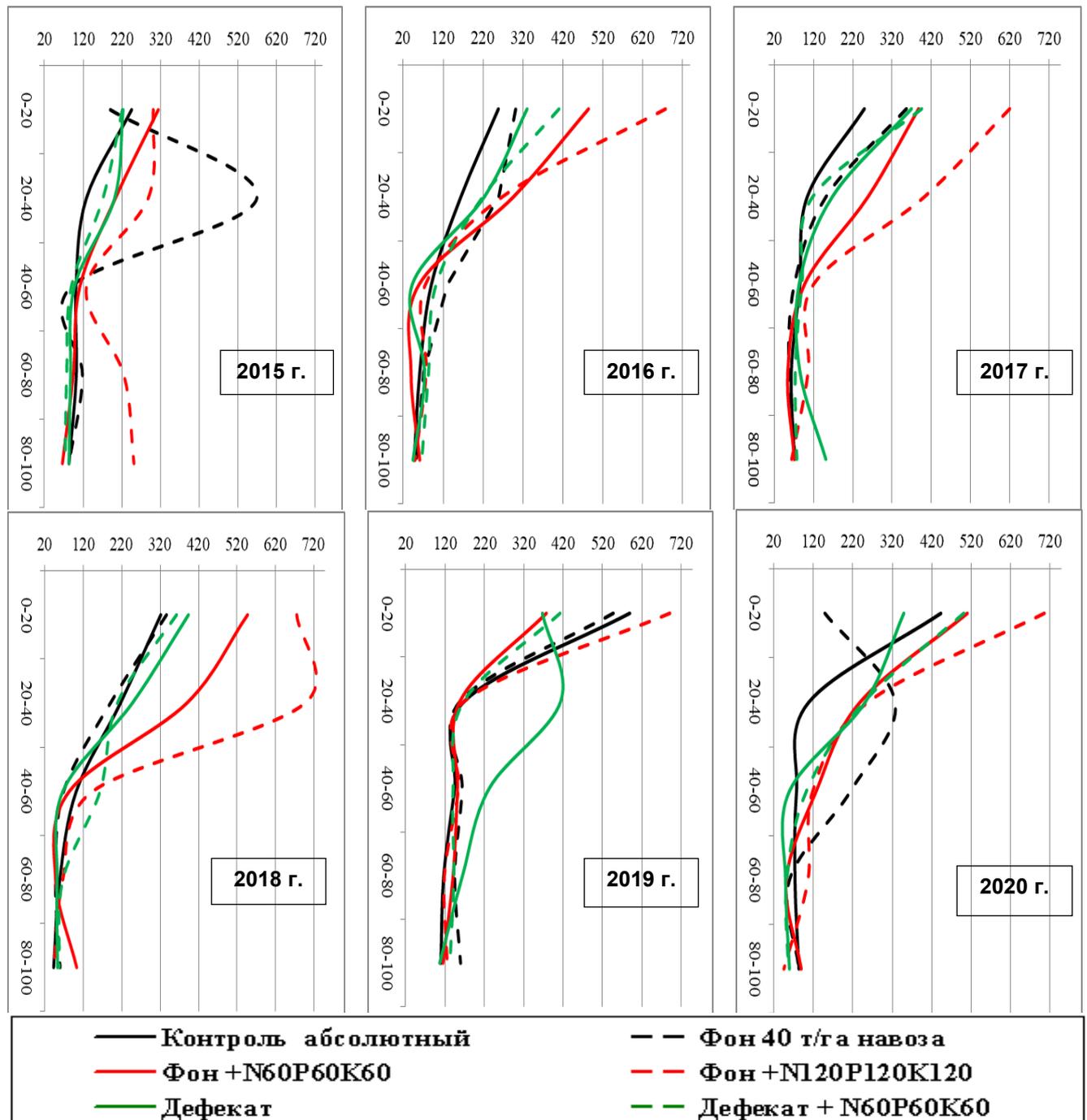


Рисунок 35 – Влияние систем применения удобрения и дефеката на содержание и характер распределения по профилю обменных и подвижных форм фосфора, мг/кг P_2O_5

Распределение обменных и подвижных форм фосфора по профилю соответствует преимущественно прогрессивно убывающему типу. Причину подобного распределения мы уже выявили и объяснили выше.

Здесь следует подчеркнуть, что за шесть лет наблюдений на вариантах с удобрениями содержание обменных и подвижных форм фосфора было выше, чем на контроле, за исключением 2019 г. На вариантах с дефекатом содержание обменных и подвижных форм фосфора превышало контроль только в 2016–2018 гг. Можно сделать вывод, что мы наблюдаем последствие дефеката, что позволяет нам говорить о его положительном влиянии на режим этих форм фосфора.

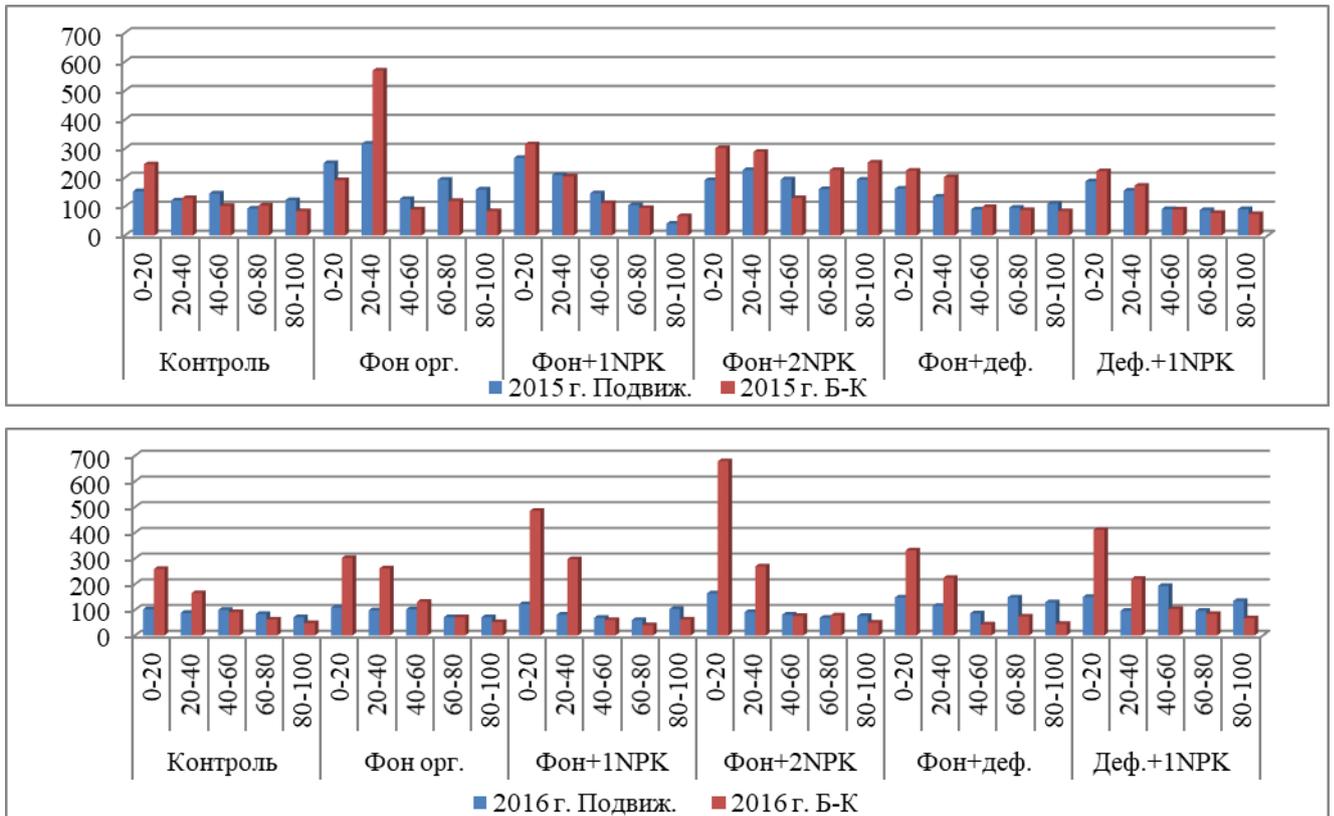
Считаем необходимым выполнить сравнение используемых методов определения подвижных форм фосфора. Данные приведены в таблице 27 и на рисунке 36.

Таблица 27 – Данные определения содержания подвижного фосфора по Чирикову, обменного и подвижного фосфора по Брейя-Куртцу, мг/кг P_2O_5

Варианты опыта	Слой, см	Годы, культуры севооборота											
		2015, оз. пш.		2016, ячмень		2017, пар		2018, оз. пш.		2019, сах. св.		2020, вико-овес	
		Ч	Б-К	Ч	Б-К	Ч	Б-К	Ч	Б-К	Ч	Б-К	Ч	Б-К
Контроль	0–20	153	246	102	259	143	250	143	322	162	590	172	444
	20–40	121	129	88	165	157	105	126	217	88	171	138	109
	40–60	145	102	100	91	86	86	160	102	72	145	88	78
	60–80	93	103	84	62	121	64	107	59	57	117	107	74
	80–100	122	84	71	48	112	72	84	43	69	110	112	84
Фон органический	0–20	250	191	109	302	133	357	133	337	140	548	121	150
	20–40	317	570	98	261	100	153	128	191	79	160	119	328
	40–60	126	90	102	131	100	72	78	69	93	164	96	215
	60–80	193	119	71	71	86	57	86	48	91	145	109	60
	80–100	159	84	71	52	88	74	109	60	57	160	102	84
Фон + 1NPK	0–20	268	315	122	485	155	388	189	548	95	378	160	511
	20–40	209	204	81	297	138	260	105	390	115	159	103	239
	40–60	146	112	69	60	164	98	72	84	102	152	84	128
	60–80	105	95	60	40	112	55	69	48	55	141	62	52
	80–100	41	67	103	62	131	72	26	103	81	115	121	90
Фон + 2NPK	0–20	191	302	164	678	274	620	194	676	145	692	191	706
	20–40	226	289	91	269	200	404	239	698	107	171	107	259
	40–60	194	129	81	76	159	121	136	145	112	155	91	119
	60–80	160	226	69	78	193	107	81	67	122	119	90	107
	80–100	193	252	76	50	114	65	93	43	67	126	79	46
Фон + дефекат	0–20	162	224	148	331	213	370	150	394	153	368	138	350
	20–40	134	202	115	224	128	169	231	248	141	415	157	252
	40–60	90	98	86	43	150	84	114	67	133	233	90	60
	60–80	96	88	148	74	93	86	90	52	141	165	129	50
	80–100	110	84	129	45	146	152	78	53	148	107	78	60
Дефекат + 1NPK	0–20	187	222	150	411	112	396	193	363	131	413	165	502
	20–40	155	172	96	220	83	119	131	209	79	169	155	248
	40–60	91	90	193	103	79	91	126	164	81	141	93	103
	60–80	88	78	96	84	103	74	117	67	84	143	84	53
	80–100	91	74	134	67	59	78	74	57	129	133	95	57

Как следует из данных таблицы 27, используемые экстрагенты извлекают разное количество фосфора. Максимальное количество обменного и подвижного фосфора, определяемого по методу Брейя-Куртца, извлекается только в слое почвы 0–40 см. Отметим, что данным методом извлекаются две формы фосфора. В нижней части профиля максимальное количество подвижного фосфора извлекается по методу Чирикова.

При этом следует акцентировать внимание на очень широком диапазоне колебаний содержания изучаемых форм фосфора как по годам наблюдений, так и по вариантам опыта. Как мы уже отмечали выше, количество экстрагируемого фосфора зависит от экстрагента и от соотношения почвы к раствору. Чем шире это отношение, тем больше извлекается та или иная форма фосфора. Если в методе Чирикова соотношение почва : раствор = 1 : 25, то по методу Брейя-Куртца это соотношение всего 1 : 7, т.е. в 3,5 раза меньше. Тем не менее при более узком соотношении почвы к экстрагенту данным методом извлекается не только больше фосфора, особенно в верхней части профиля, но и еще две его формы – обменный и подвижный фосфор. Наиболее наглядно эти различия представлены на рисунке 36.



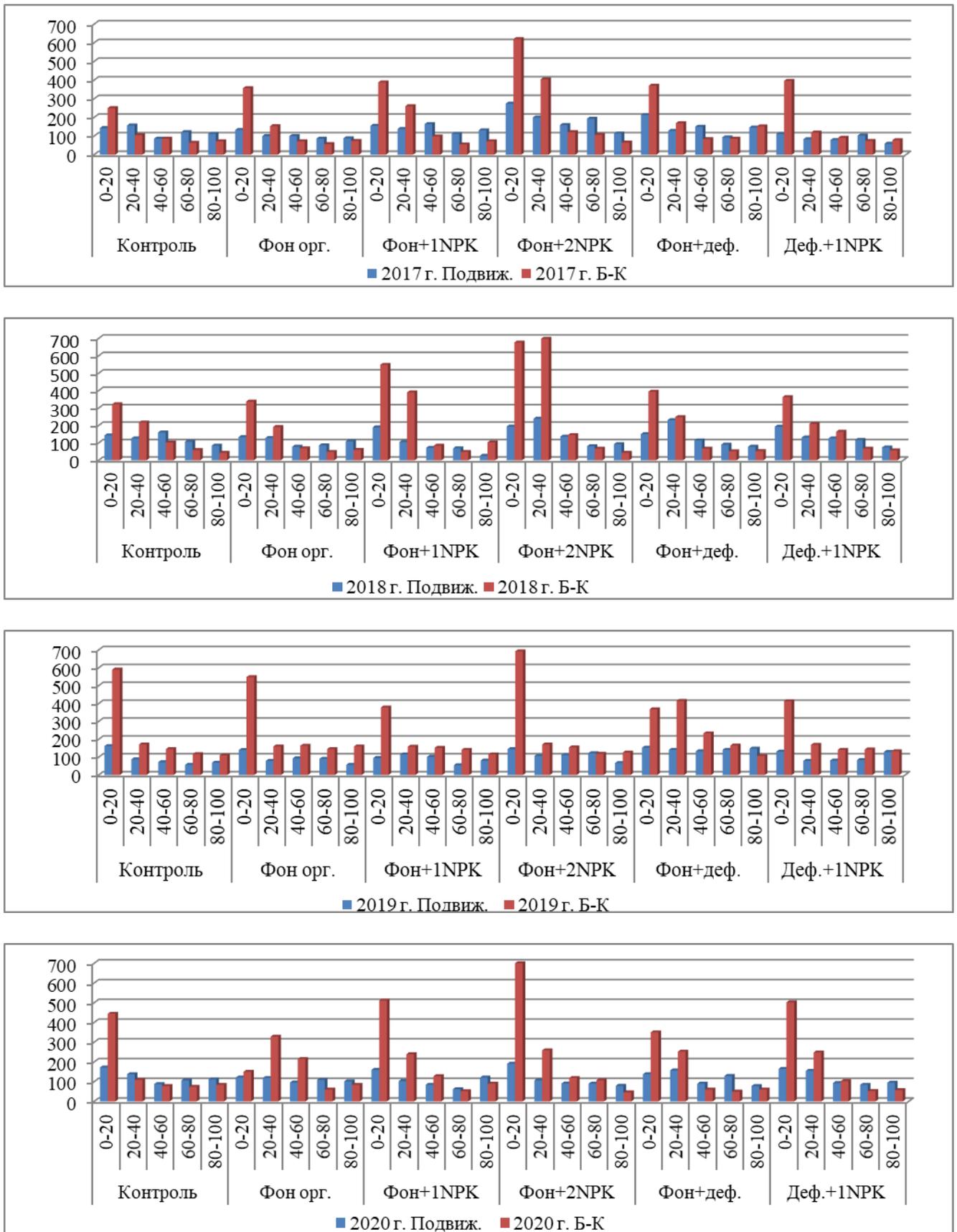


Рисунок 36 – Влияние систем удобрения и дефекта на содержание подвижного фосфора по Чирикову, обменного и подвижного фосфора по Брейя-Куртцу, мг/кг P₂O₅

Как следует из данных, представленных на рисунке 36, если в 2015 г. различия по экстрагируемости изучаемых форм фосфора были не столь явными, то в последующие годы – более четкими. Как уже отмечалось выше, наиболее значимые различия наблюдаются в верхней части профиля. Эти различия обусловлены главным образом, разной природой применяемых экстрагентов и, конечно же, существенным различием соотношения почвы к экстрагенту.

Практически по всем годам наблюдений, за исключением вариантов с дефекатом в 2015 и 2019 гг., на удобренных вариантах извлекалось больше изучаемых форм фосфора, чем на контроле, особенно по методу Брейя-Куртца. Причем эти различия носили кратный характер. Опять же следует подчеркнуть, что это обусловлено преимущественно природой экстрагента, применяемого в методике Брейя-Куртца. Мы уже отмечали, что максимальное количество этих форм фосфора извлекается из верхних слоев изучаемой почвы, что обусловлено агрогенным воздействием.

Подвижные формы фосфора формируют по Беккету и Уайту фактор емкости. Для оценки потенциальной буферной способности изучаемой почвы необходимо изучить еще и фактор интенсивности. Фактор интенсивности нами определен по методу Карпинского и Замятиной. Данные определений приведены в таблице 28.

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 контроля в пахотном слое содержание ортофосфатов изменяется в пределах 26–83 мг/кг, при среднем содержании 51 мг/кг.

На варианте органической системы удобрения содержание ортофосфатов было ниже, чем на контроле и варьировало в более узком пределе – 38–53 мг/кг, при среднем содержании 43 мг/кг. На вариантах органоминеральной системы удобрения с одинарной и двойной дозой минеральных удобрений 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 контроле и варианте органической системы удобрения.

Таблица 28 – Влияние систем применения удобрения и дефеката на содержание и характер распределения по профилю ортофосфатов, мг/кг P₂O₅

Варианты опыта	Слой, см	Годы						Среднее за 6 лет
		2015	2016	2017	2018	2019	2020	
Контроль	0–20	38	52	26	65	40	83	51
	20–40	29	60	46	45	43	71	49
	40–60	31	34	34	95	38	60	49
	60–80	43	38	7	45	29	67	38
	80–100	31	40	74	28	40	43	43
Фон орг.	0–20	40	45	53	38	40	40	43
	20–40	126	36	40	52	31	53	56
	40–60	10	57	71	46	34	33	42
	60–80	34	53	34	50	41	69	47
	80–100	48	48	31	53	50	60	48
Фон+1NPK	0–20	53	52	62	62	41	53	54
	20–40	52	45	41	31	38	33	40
	40–60	45	60	62	43	36	43	48
	60–80	41	48	38	33	21	43	37
	80–100	45	46	28	60	21	62	44
Фон+2NPK	0–20	107	74	40	69	59	98	74
	20–40	64	79	48	57	50	64	60
	40–60	57	50	46	62	93	45	59
	60–80	84	28	53	53	67	59	57
	80–100	57	46	31	34	40	45	42
Фон+деф.	0–20	84	55	28	57	41	93	60
	20–40	72	46	48	41	33	50	48
	40–60	67	43	33	36	36	60	46
	60–80	62	41	45	86	52	86	62
	80–100	60	21	88	29	38	59	49
Деф.+1NPK	0–20	67	31	34	71	48	59	52
	20–40	52	33	57	71	71	74	60
	40–60	38	41	41	43	28	88	46
	60–80	36	21	36	31	50	38	35
	80–100	64	20	34	53	60	57	48
НСП ₀₅		20,41						

На варианте с дефекатом по органическому фону и совместно с одинарной дозой минеральных удобрений 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 контроле и с органической системой удобрения.

Следует обратить внимание на то, что практически по всем годам наблюдений, за исключением 2018 г., на вариантах с удобрениями и дефекатом содержание ортофосфатов было выше, чем на контроле.

Таким образом, последствие дефеката проявляется в закреплении ортофосфатов за счет образования малорастворимых гуматов кальция. Тип распределения по профилю ортофосфатов представлен на рисунке 37.

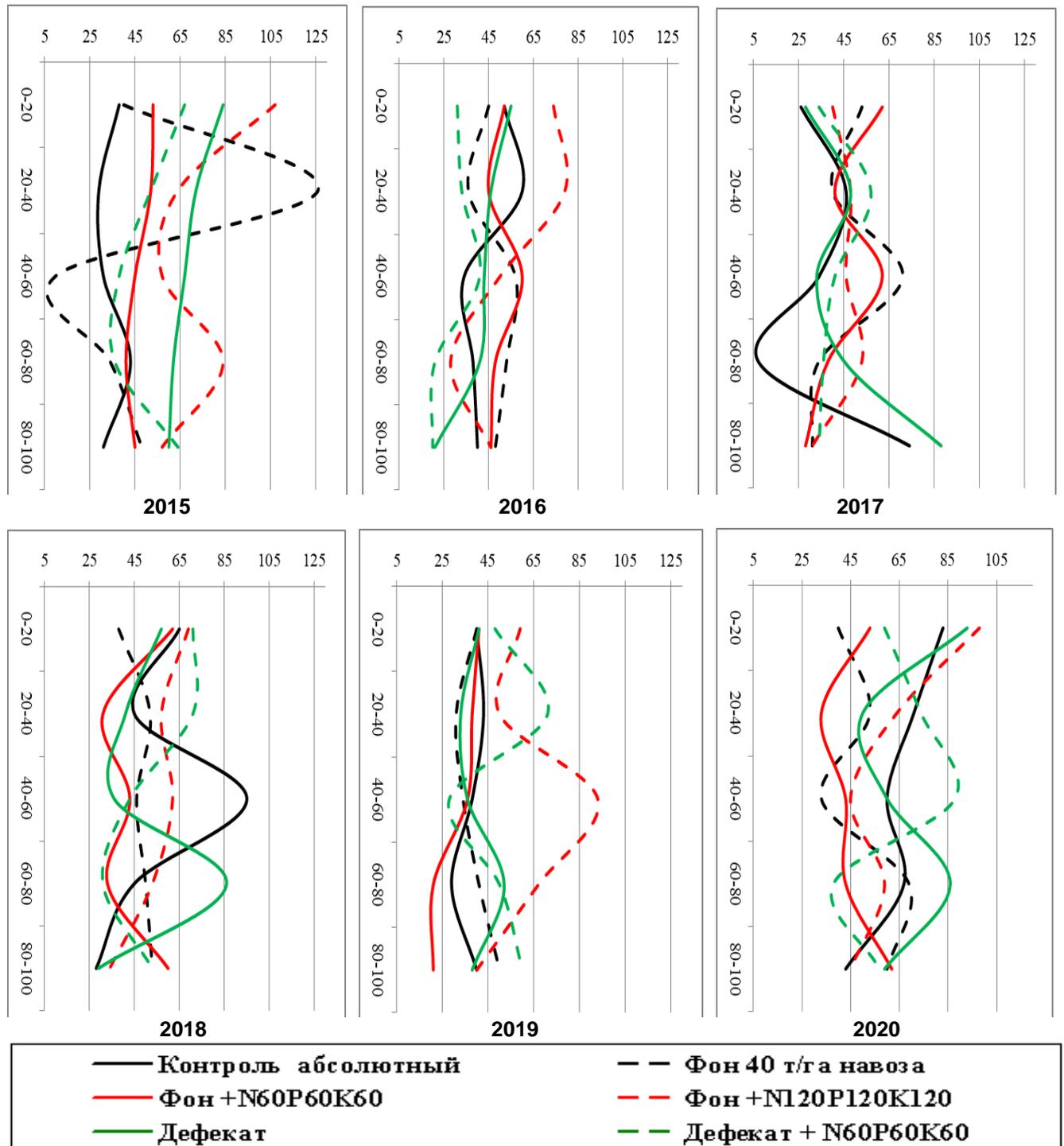


Рисунок 37 – Влияние систем применения удобрения и дефеката на содержание и характер распределения по профилю ортофосфатов, мг/кг P_2O_5

Распределение ортофосфатов по профилю на всех вариантах было преимущественно элювиально-иллювиальное. Оценку уровня содержания ортофосфатов за ротацию севооборота можно выполнить, используя данные таблицы 28 и рисунка 38.

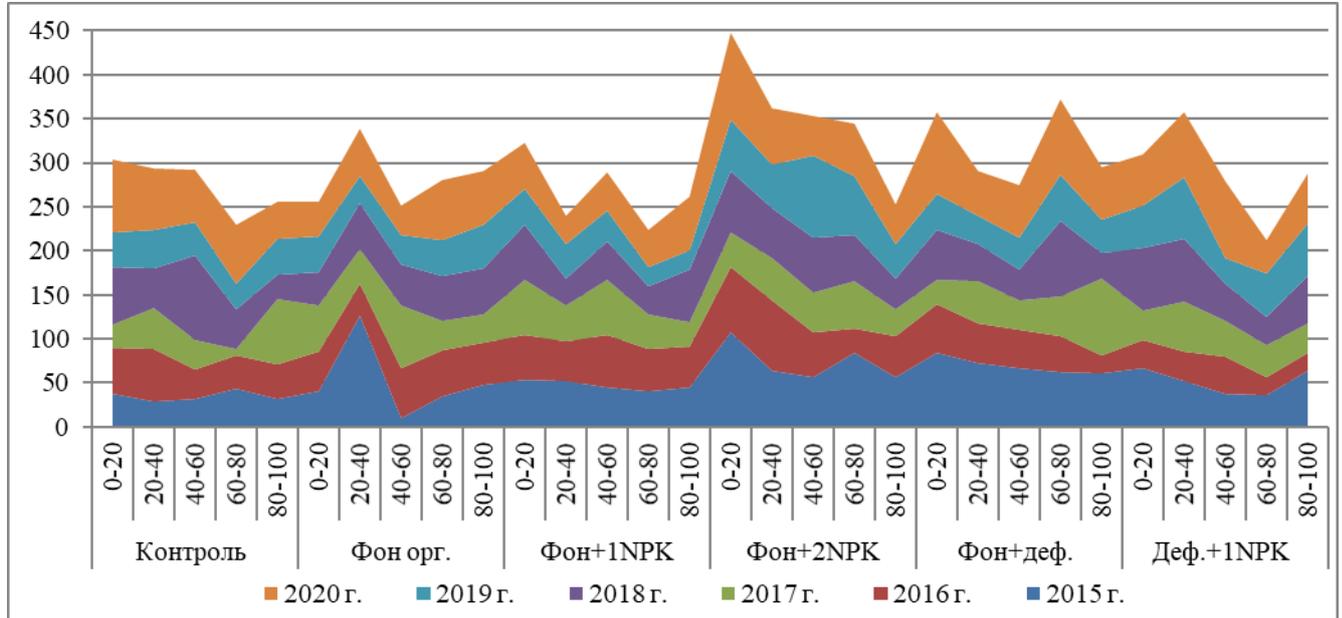


Рисунок 38 – Влияние систем удобрения и дефека на содержание ортофосфатов за ротацию севооборота, мг/кг P₂O₅

Так, в пахотном слое среднее содержание ортофосфатов на контроле достигло 51 мг/кг, на варианте органической системы удобрения – 43 мг/кг, на вариантах органоминеральной системы удобрения и с дефекатом – 54, 74, 60 и 52 мг/кг соответственно.

Длительное применение систем удобрения и дефека обусловили более высокое содержание ортофосфатов, прежде всего в пахотном слое, и в целом в пределах гумусового горизонта по сравнению с контролем.

Мы недаром ставили задачу выполнить сравнение методов определения подвижных форм фосфора. Общепринятый в системе агрохимической службы метод Чирикова использует очень широкое соотношение почвы к экстрагенту, равное 1 : 25, что приводит к извлечению не только собственно подвижных форм фосфора, но и части кислоторастворимых форм, особенно в нижней части профиля почвы. Но в верхней части, как мы уже показали, по методу Брейя-Куртца из-

влекается в разы больше подвижного и обменного фосфора. Основная масса корневой системы растений располагается слое 30–50 см. Считаем, что метод Брейя-Куртца дает более объективную и достоверную характеристику фосфатного состояния почвы.

Математическая обработка показывает преимущество метода Брейя-Куртца перед методом Чирикова. Данные приведены в таблице 29.

Таблица 29 – Корреляции различных форм фосфора, извлеченных с использованием методов Чирикова и Брейя-Куртца

2015 г.	2016 г.	2017 г.	2018 г.	2019 г.	2020 г.
Общий фосфор с подвижным по Чирикову					
$r = 0,664$	$r = 0,429$	$r = 0,742$	$r = 0,696$	$r = 0,139$	$r = 0,578$
Общий фосфор с подвижным и обменным по Брейя-Куртцу					
$r = 0,661$	$r = 0,877$	$r = 0,851$	$r = 0,841$	$r = 0,299$	$r = 0,762$
Минеральный фосфор с подвижным по Чирикову					
$r = 0,543$	$r = 0,538$	$r = 0,628$	$r = 0,764$	$r = 0,372$	$r = 0,600$
Минеральный фосфор с подвижным и обменным по Брейя-Куртцу					
$r = 0,486$	$r = 0,849$	$r = 0,922$	$r = 0,966$	$r = 0,863$	$r = 0,775$
Органический фосфор с подвижным по Чирикову					
$r = 0,286$	$r = 0,262$	$r = 0,432$	$r = 0,556$	$r = -0,156$	$r = 0,102$
Органический фосфор с подвижным и обменным по Брейя-Куртцу					
$r = 0,316$	$r = 0,719$	$r = 0,655$	$r = 0,628$	$r = -0,383$	$r = 0,150$

Анализ данных таблицы 29 показывает, что между всеми формами фосфора, определенными по методу Чирикова и Брейя-Куртца, есть различия по тесноте связи по всем годам наблюдений. Во всех случаях теснота связи всех форм фосфора с подвижным и обменным фосфором, определенными по методу Брейя-Куртца, существенно выше, чем по методу Чирикова.

4.3 Влияние систем применения удобрения и дефеката на потенциальную буферную способность в отношении фосфатов

Первыми изучать фосфатный режим почв стали такие известные русские ученые, как Д.И. Менделеев [102], А.И. Энгельгардт [173], П.А. Костычев [82], Д.Н. Прянишников [130]. Они первые заложили опыты, направленные на изучение реакции разных сельскохозяйственных культур на фосфорные удобрения.

Огромный вклад в изучение фосфора в системе «фосфор – почва – растение» внесли такие известные ученые, как А.П. Душечкин [53, 54], К.К. Гедройц [34], М.А. Егоров [56], Н.П. Карпинский [70], А.Ф. Тюлин [153], Ф.В. Чириков [167], В.В. Геммерлинг [35], С.А. Кудрин [93], П.А. Дмитренко [43], Д.Л. Аскинази [15], А.В. Соколов [139, 140], П.Г. Адерихин [4, 5] и др. В этих и других научных работах ученые экспериментально доказали подчиненность эффективности различных форм фосфатов от агрохимических свойств почв, а также реакции растений [61].

Ученые на основании экспериментальных данных вывели почвенные индексы фосфоритования, которые влияют на доступность фосфатов алюминия, железа и кальция в почвах разного типа. Помимо этого ученые изучили много остальных проблем и установили, что повысить эффективность вносимых удобрений можно только тогда, когда будет глубокое понимание их свойств, отличий их превращений на разных почвах.

С.М. Драчев первым ввел понятие о потенциальной буферной способности почвы. На основании проведенных им исследований о мобильности фосфатов в почвах, он установил, что значительно более интересным представляется определение не концентрации фосфатов в почвенном растворе, а способность почвы поддерживать эту концентрацию на известном уровне по мере потребления фосфатов живыми организмами. Это свойство почвы называется буферность почвы в отношении фосфатов.

Потенциальную буферную способность почвы часто оценивают по соотношению факторов емкости (Q) и интенсивности ($ПБС = Q/I$), которые в свою очередь находят по изотермам сорбции [118, 119]. Обзор литературы и теоретическое обоснование применения химических потенциалов и показателей буферности почв с позиций химической термодинамики, выполненные Н.А. Канунниковой [65, 66], К.А. Блэк [20], Н.П. Карпинским, В.Б. Замятиным [67], Н.П. Карпинским [69], Н.П. Карпинским, Н.М. Глазуновой [68], В.Д. Муха [109], показали, что в группе почв, сходных по свойствам и генезису, содержание фосфора в кислотных, щелочных, буферных вытяжках (фактор «емкость») хорошо коррелирует с кон-

центрацией фосфора в водных и солевых вытяжках (фактор «интенсивность»), поэтому каждый из этих методов может быть использован для характеристики обеспеченности почв фосфатами.

В группе несходных почв корреляция между показателями «емкости» и «интенсивности» обычно отсутствует и приходится в каждом конкретном случае устанавливать, какой тип определения более подходит для установления степени обеспеченности фосфором той или иной почвы [61]. Некоторые почвы из-за своей особенности содержат в себе большое количество кислоторастворимого фосфора. Лучше для оценки плодородия, по содержанию в таких почвах фосфора использовать водные и слабосолевые вытяжки.

Насколько растения обеспечены 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:

$$РВСП = Q/I, \quad (4)$$

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. Отношение Q/I показывает, какое количество подвижных фосфатов должно перейти из их общего запаса в почвенный раствор или должно быть внесено в почву для изменения активности H_2PO_4 на одну единицу.

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 сельскохозяйственных культур фосфатному режиму соответствует концентрация в почвенном растворе или слабосолевых вытяжках 0,2–0,3 мг/л фосфора.

Из опубликованных литературных данных величина фосфорного потенциала, равная 7, говорит о нормальном фосфорном режиме почвы. Если же фосфатный режим более 7, фосфорное питание растений становится гораздо хуже. А.Ю. Кудеярова [89] оптимальную границу (с почвенными культурами) обеспеченности растений овса и гречихи фосфором определяла значениями фосфатных потенциалов дерново-подзолистой почвы 5,94–5,07, в то время как при значениях фосфатного потенциала ниже 4,7–4,8 растения были перенасыщены фосфором, что приводило к их стрессу [61].

Все вышеперечисленное дает основание считать, что для разных почв фосфатный режим характеризуется различным фосфатным потенциалом и поэтому единые индексы по фосфатному потенциалу вряд ли возможны. Они должны быть получены опытным путем для каждого конкретного почвенного типа с учетом биологических особенностей растений [61].

Использование каждого показателя для оценки фактора «интенсивности» зависит от целей и задач исследования [61].

Определение РВСП нами выполнено по отношению подвижного фосфора – «фактора емкости», определенного по методу Чирикова (Таблица 27) и Брейя-Куртца (Таблица 26), к ортофосфатам – «фактору интенсивности», определенному по Карпинскому и Замятиной (Таблица 30).

Считаем что подобный расчет с учетом определения подвижных форм фосфора, выполненных разными методами вполне допустимо (Таблица 30). Величина РВСП сильно варьирует как по годам наблюдений, так и по вариантам опыта. Так как оценку физико-химических показателей выполняют по пахотному слою, мы оценивали РВСП подобным же образом. Так, на варианте контроля величина РВСП изменялась в пределах 1,96–5,50, при среднем значении 3,30. На варианте органической системы удобрения величина РВСП варьирует в пределах 2,42–6,25, при среднем значении 3,53.

На вариантах органоминеральной системы удобрения с одинарной и двойной дозой минеральных удобрений и вариантах с дефекатом по органическому фону и совместно с одинарной дозой минеральных удобрений величина РВСП из-

менялась 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 органической системы удобрения, а на вариантах с дефекатом она выше, чем на вариантах с органоминеральной системой удобрения (Таблица 30).

Таблица 30 – Влияние систем удобрения и дефеката на величину РВСП

Варианты опыта	Слой, см	Годы						Среднее значение
		2015	2016	2017	2018	2019	2020	
Контроль	0–20	4,03	1,96	5,50	2,20	4,05	2,07	3,30
	20–40	4,17	1,47	3,41	2,80	2,05	1,94	2,64
	40–60	4,68	2,94	2,53	1,68	1,89	1,47	2,53
	60–80	2,16	2,21	17,29	2,38	1,96	1,60	4,60
	80–100	3,93	1,77	1,51	3,00	1,72	2,60	2,42
Фон органический	0–20	6,25	2,42	2,51	3,50	3,50	3,02	3,53
	20–40	2,52	2,72	2,50	2,46	2,55	2,24	2,50
	40–60	12,60	1,79	1,41	1,70	2,73	2,91	3,86
	60–80	5,68	1,34	2,53	1,72	2,22	1,58	2,52
	80–100	3,31	1,50	2,84	2,06	1,14	1,70	2,10
Фон + 1NPK	0–20	5,06	2,35	2,50	3,05	2,32	3,02	3,05
	20–40	4,02	1,80	3,37	3,39	3,03	3,12	3,12
	40–60	3,24	1,15	2,64	1,67	2,83	1,95	2,25
	60–80	2,56	1,25	2,95	2,09	2,62	1,44	2,15
	80–100	0,91	2,24	4,68	0,43	3,86	1,95	2,34
Фон + 2NPK	0–20	1,78	2,22	6,85	2,81	2,46	1,95	3,01
	20–40	3,53	1,15	4,17	4,19	2,14	1,67	2,81
	40–60	3,40	1,62	3,46	2,19	1,20	2,02	2,31
	60–80	1,90	2,46	3,64	1,53	1,82	1,52	2,14
	80–100	3,39	1,65	3,68	2,73	1,67	1,75	2,48
Фон + дефекат	0–20	1,93	2,69	7,61	2,63	3,73	1,48	3,34
	20–40	1,86	2,50	2,67	5,63	4,27	3,14	3,34
	40–60	1,34	2,00	4,54	3,17	3,69	1,50	2,71
	60–80	1,55	3,61	2,07	1,05	2,71	1,50	2,08
	80–100	1,83	6,14	1,66	2,69	3,89	1,32	2,92
Дефекат + 1NPK	0–20	2,79	4,84	3,29	2,72	2,73	2,80	3,19
	20–40	2,80	2,91	1,46	1,84	1,11	2,09	2,03
	40–60	2,39	4,71	1,93	2,93	2,89	1,06	2,65
	60–80	2,44	4,57	2,86	3,77	1,68	2,21	2,92
	80–100	1,42	6,70	1,73	1,40	2,15	1,67	2,51

Как следует из полученных нами данных, оптимальная величина РВСР около 7 не превышена в пахотном слое изучаемой почвы ни на одном из вариантов. Но в отдельных горизонтах разных вариантов наблюдаются очень высокие величины РВСР, как например, на варианте контроля в 2017 г. в слое 60–80 см она достигает 17,29, а на варианте органической системы удобрения в 2015 г. в слое 40–60 см – 12,60.

Характер распределения величины РВСР по профилю неодинаков по профилю на изучаемых вариантах, однако он преимущественно аккумулятивно-элювиально-иллювиальный, что наглядно представлено на рисунке 39.

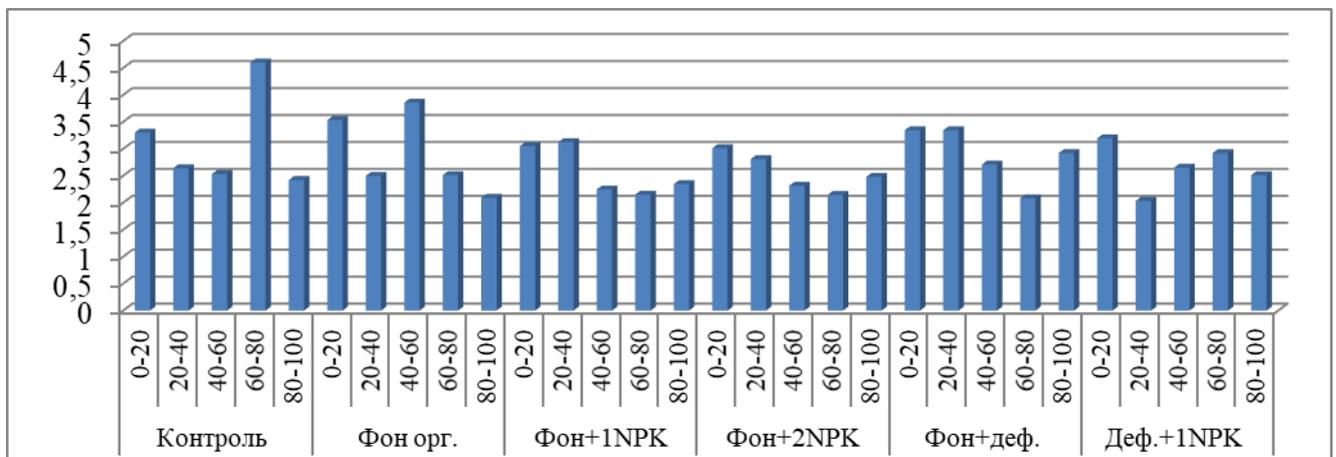


Рисунок 39 – Средние величины РВСР за ротацию севооборота

Как мы уже отмечали выше, максимальная величина РВСР в пахотном слое наблюдается на вариантах контроля и органической системы удобрения. Отметим, что на этих же вариантах профиль почвы наиболее дифференцирован по величине РВСР. Минимальная величина РВСР на вариантах опыта наблюдается в разных слоях. Так, на вариантах контроля и органической системы удобрения она находится на глубине 80–100 см, на вариантах органоминеральной системы удобрения и применения дефека по органическому фону в слое 60–80 см, а на варианте применения дефека совместно с одинарной дозой минеральных удобрений – в слое 20–40 см.

В таблице 31 приведены данные определения величины РВСР, в качестве фактора емкости использованы результаты определения содержания подвижного и обменного фосфора по Брейя и Куртцу. 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.

Таблица 31 – Влияние систем удобрения и дефеката на величину РВСП

Варианты опыта	Слой, см	Годы						Среднее значение
		2015	2016	2017	2018	2019	2020	
Контроль	0–20	6,47	4,98	9,61	4,95	14,75	5,35	7,68
	20–40	4,45	2,75	2,28	4,82	3,98	1,53	3,30
	40–60	3,29	2,68	2,53	1,07	3,82	1,30	2,45
	60–80	2,39	1,63	9,14	1,31	4,03	1,10	3,27
	80–100	2,71	1,20	0,97	1,54	2,75	1,95	1,85
Фон органический	0–20	4,77	6,71	6,74	8,87	13,70	3,75	7,42
	20–40	4,52	7,25	3,82	3,67	5,16	6,19	5,10
	40–60	9,00	2,30	1,01	1,50	4,82	6,51	4,19
	60–80	3,50	1,34	1,68	0,96	3,54	0,87	1,98
	80–100	1,75	1,08	2,39	1,13	3,20	1,40	1,82
Фон + 1NPK	0–20	5,94	9,33	6,26	8,84	9,22	9,64	8,20
	20–40	3,92	6,60	6,34	12,58	4,18	7,24	6,81
	40–60	2,49	1,00	1,58	1,95	4,22	2,98	2,37
	60–80	2,32	0,83	1,45	1,45	6,71	1,21	2,33
	80–100	1,49	1,35	2,57	1,72	5,48	1,45	2,34
Фон + 2NPK	0–20	2,82	9,16	15,50	9,80	11,73	7,20	9,37
	20–40	4,52	3,40	8,42	12,25	3,42	4,05	6,01
	40–60	2,26	1,52	2,63	2,34	1,67	2,64	2,18
	60–80	2,69	2,79	2,02	1,26	1,78	1,81	2,06
	80–100	4,42	1,09	2,10	1,26	3,15	1,02	2,17
Фон + дефекат	0–20	2,67	6,02	13,21	6,91	8,98	3,76	6,92
	20–40	2,80	4,87	3,52	6,05	12,58	5,04	5,81
	40–60	1,46	1,00	2,54	1,86	6,47	1,00	2,39
	60–80	1,42	1,80	1,91	0,61	3,17	0,58	1,58
	80–100	1,40	2,14	1,73	1,83	2,82	1,02	1,82
Дефекат + 1NPK	0–20	3,31	13,26	11,65	5,11	8,60	8,51	8,41
	20–40	3,31	6,67	2,09	2,94	2,38	3,35	3,46
	40–60	2,37	2,51	2,22	3,81	5,04	1,17	2,85
	60–80	2,17	4,00	2,05	2,16	2,86	1,39	2,43
	80–100	1,16	3,35	2,29	1,07	2,22	1,00	1,85
НСП ₀₅		2,75						

Как следует из полученных нами данных, в пахотном слое на контроле величина РВСП изменялась в пределах 4,95–14,75, при среднем значении 7,68; на

варианте органической системы удобрения – в диапазоне 3,75–13,70, при среднем значении 7,42. На вариантах органоминеральной системы удобрения с одинарной и двойной дозой минеральных удобрений 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 применения дефектата по органическому фону и с одинарной дозой минеральных удобрений величина РВСП варьировала в широком диапазоне 2,67–13,21 и 3,31–13,26, при средних значениях 6,92 и 8,41 соответственно.

Как следует из полученных нами данных, оптимальная величина РВСП около 7 превышена, судя по средним значениям, практически на всех вариантах за исключением варианта применения дефектата 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. Следует отметить, что в пахотном слое вариантов контроля и органической системы удобрения и с дефектатом по органическому фону превышение мы видим два раза за 6 лет, а на вариантах органоминеральной системы удобрения с одинарной дозой минеральных удобрений – 4 раза и с двойной дозой минеральных удобрений – 5 раз.

Особенности изменения средних величин РВСП по профилю изучаемой почвы представлены на рисунке 40.

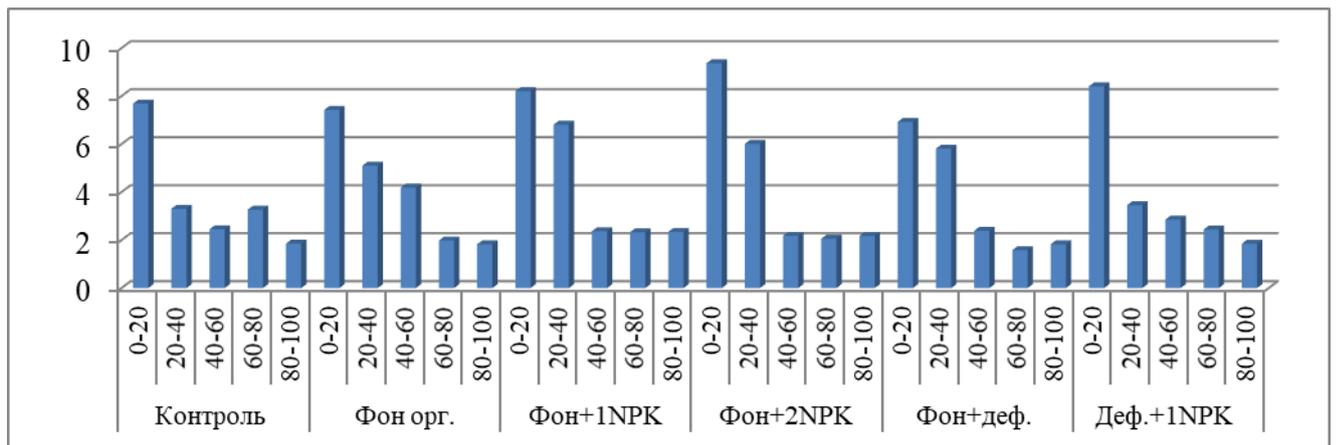


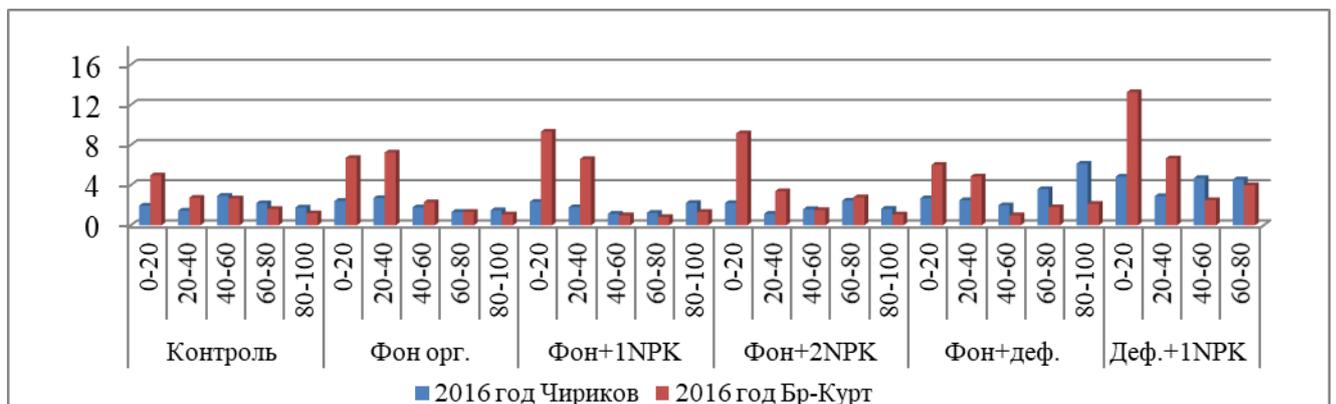
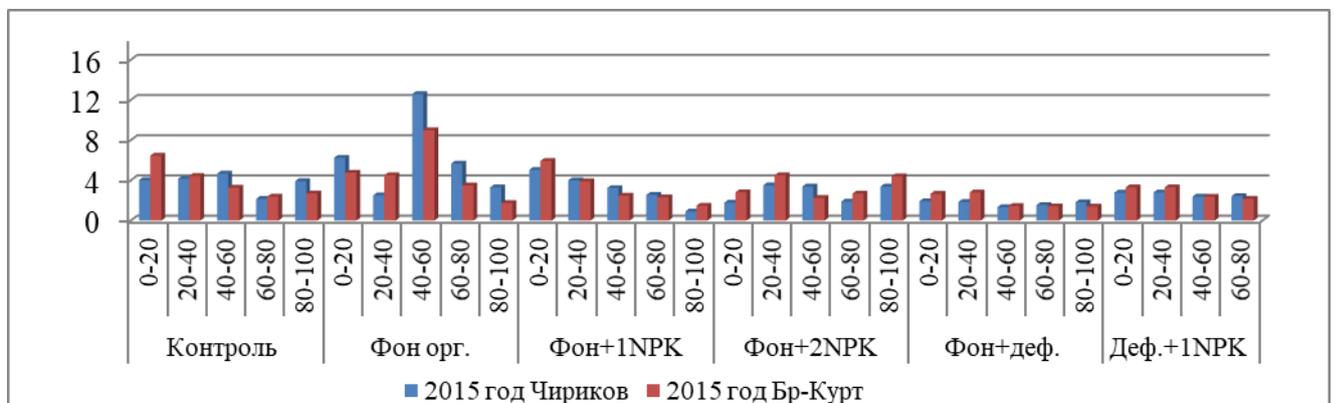
Рисунок 40 – Средние величины РВСП за ротацию севооборота

Как следует из данных рисунка 40, профиль изучаемой почвы слабо дифференцирован по величине РВСП, а характер его распределения по профилю соответствует прогрессивно убывающему типу на всех вариантах, кроме контрольного, на котором он аккумулятивно-элювиально-иллювиальный.

Следует отметить, что величина РВСП, определенная по методу Брейя-Куртца более предпочтительна, так как учитывает две доступные растениям формы фосфора, а не только подвижные формы, как по методу Чирикова. Это обстоятельство является важным, так как именно обменные формы фосфора являются наиболее доступными для растений. После проведения эксперимента мы выполнили сравнение результатов, полученных с использованием данных по методу Чирикова и по методу Брейя-Куртца. Данные представлены на рисунке 41 и в таблице 32.

Как следует из таблицы 32, величины РВСП, определенные с использованием данных, полученных по методу Чирикова и методу Брейя-Куртца, различаются в наибольшей степени только в слое почвы 0–40 см, в нижележащих слоях они довольно близки. Однако различия сохраняются, при этом величины, определенные с использованием данных, полученных по методу Чирикова, являются более высокими.

Выявленные нами различия величин РВСП наглядно иллюстрируют данные рисунка 41.



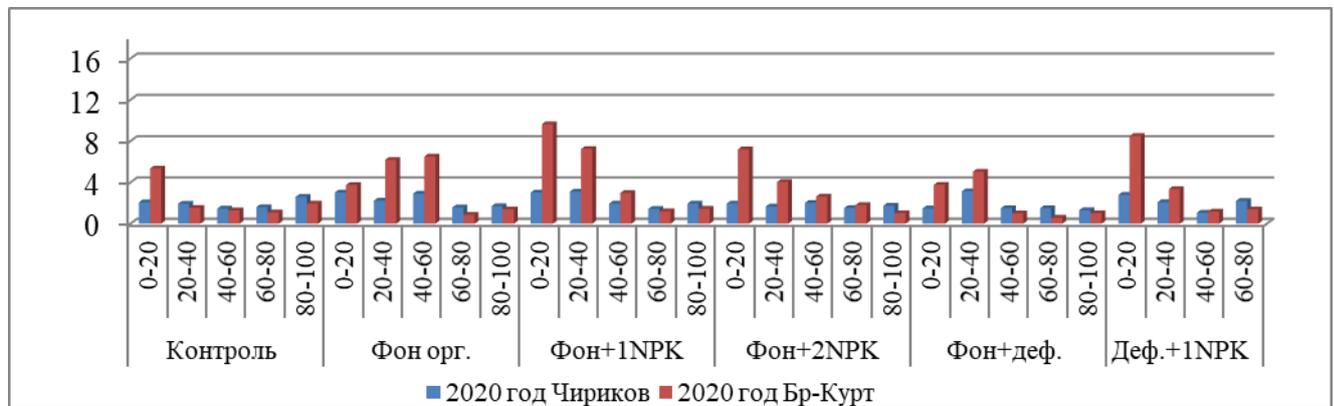
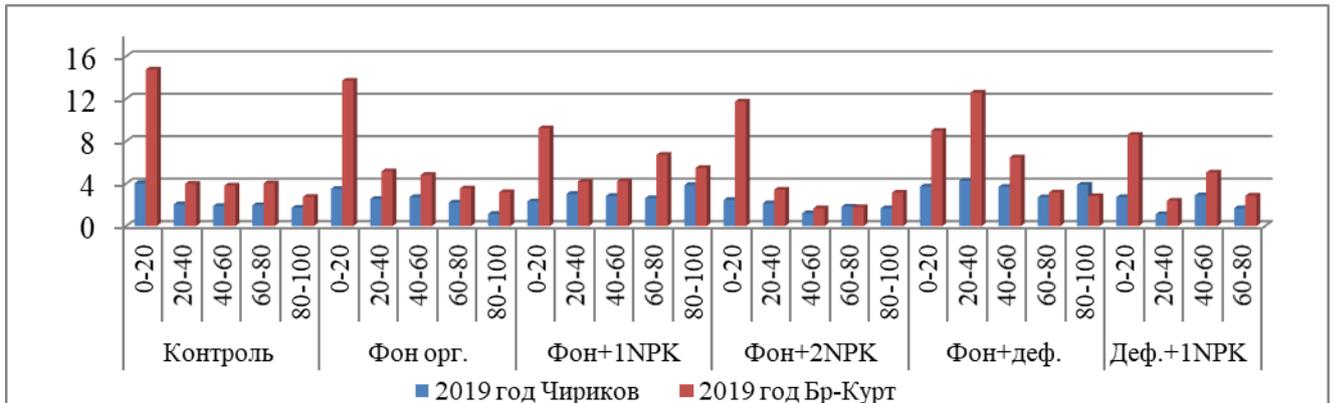
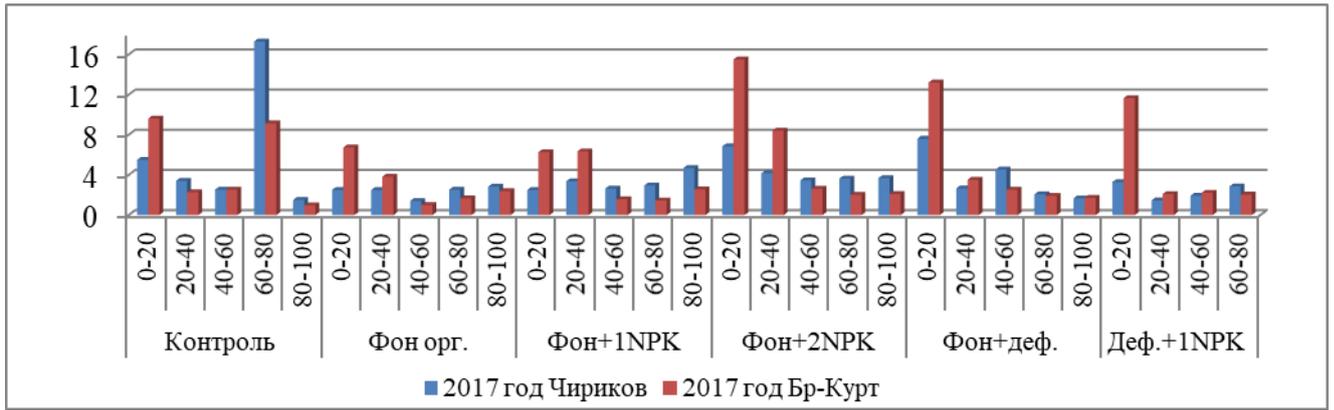


Рисунок 41 – Влияние систем применения удобрения и дефеката на величину РВСП

Таблица 32 – Влияние систем удобрения и дефеката на величину РВСП

Варианты опыта	Слой, см	Годы											
		2015		2016		2017		2018		2019		2020	
		Ч	Б-К	Ч	Б-К	Ч	Б-К	Ч	Б-К	Ч	Б-К	Ч	Б-К
Контроль	0–20	4,03	6,47	1,96	4,98	5,50	9,61	2,20	4,95	4,05	14,75	2,07	5,35
	20–40	4,17	4,45	1,47	2,75	3,41	2,28	2,80	4,82	2,05	3,98	1,94	1,53
	40–60	4,68	3,29	2,94	2,68	2,53	2,53	1,68	1,07	1,89	3,82	1,47	1,30
	60–80	2,16	2,39	2,21	1,63	17,29	9,14	2,38	1,31	1,96	4,03	1,60	1,10
	80–100	3,93	2,71	1,77	1,20	1,51	0,97	3,00	1,54	1,72	2,75	2,60	1,95
Фон органический	0–20	6,25	4,77	2,42	6,71	2,51	6,74	3,50	8,87	3,50	13,70	3,02	3,75
	20–40	2,52	4,52	2,72	7,25	2,50	3,82	2,46	3,67	2,55	5,16	2,24	6,19
	40–60	12,60	9,00	1,79	2,30	1,41	1,01	1,70	1,50	2,73	4,82	2,91	6,51
	60–80	5,68	3,50	1,34	1,34	2,53	1,68	1,72	0,96	2,22	3,54	1,58	0,87
	80–100	3,31	1,75	1,50	1,08	2,84	2,39	2,06	1,13	1,14	3,20	1,70	1,40
Фон + 1НПК	0–20	5,06	5,94	2,35	9,33	2,50	6,26	3,05	8,84	2,32	9,22	3,02	9,64
	20–40	4,02	3,92	1,80	6,60	3,37	6,34	3,39	12,58	3,03	4,18	3,12	7,24
	40–60	3,24	2,49	1,15	1,00	2,64	1,58	1,67	1,95	2,83	4,22	1,95	2,98
	60–80	2,56	2,32	1,25	0,83	2,95	1,45	2,09	1,45	2,62	6,71	1,44	1,21
	80–100	0,91	1,49	2,24	1,35	4,68	2,57	0,43	1,72	3,86	5,48	1,95	1,45
Фон + 2НПК	0–20	1,78	2,82	2,22	9,16	6,85	15,50	2,81	9,80	2,46	11,73	1,95	7,20
	20–40	3,53	4,52	1,15	3,40	4,17	8,42	4,19	12,25	2,14	3,42	1,67	4,05
	40–60	3,40	2,26	1,62	1,52	3,46	2,63	2,19	2,34	1,20	1,67	2,02	2,64
	60–80	1,90	2,69	2,46	2,79	3,64	2,02	1,53	1,26	1,82	1,78	1,52	1,81
	80–100	3,39	4,42	1,65	1,09	3,68	2,10	2,73	1,26	1,67	3,15	1,75	1,02
Фон + дефекат	0–20	1,93	2,67	2,69	6,02	7,61	13,21	2,63	6,91	3,73	8,98	1,48	3,76
	20–40	1,86	2,80	2,50	4,87	2,67	3,52	5,63	6,05	4,27	12,58	3,14	5,04
	40–60	1,34	1,46	2,00	1,00	4,54	2,54	3,17	1,86	3,69	6,47	1,50	1,00
	60–80	1,55	1,42	3,61	1,80	2,07	1,91	1,05	0,61	2,71	3,17	1,50	0,58
	80–100	1,83	1,40	6,14	2,14	1,66	1,73	2,69	1,83	3,89	2,82	1,32	1,02
Дефекат + 1НПК	0–20	2,79	3,31	4,84	13,26	3,29	11,65	2,72	5,11	2,73	8,60	2,80	8,51
	20–40	2,80	3,31	2,91	6,67	1,46	2,09	1,84	2,94	1,11	2,38	2,09	3,35
	40–60	2,39	2,37	4,71	2,51	1,93	2,22	2,93	3,81	2,89	5,04	1,06	1,17
	60–80	2,44	2,17	4,57	4,00	2,86	2,05	3,77	2,16	1,68	2,86	2,21	1,39
	80–100	1,42	1,16	6,70	3,35	1,73	2,29	1,40	1,07	2,15	2,22	1,67	1,00

Как было сказано ранее, самые большие различия величин РВСП оказались в верхнем слое профиля 0–40 см, когда преобладает величина РВСП, определенная по методу Брейя-Куртца, а в нижней части профиля она выше по методу Чирикова. В некоторые годы величина РВСП максимальные значения имеет не толь-

ко в верхней части профиля, но и в нижележащих слоях. Чаще всего это слой 40–60 см, что обусловлено илювирированностью профиля изучаемой почвы и накоплением соединений фосфора в нижней части гумусового слоя.

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

Соединения фосфора, поступающие в почву с удобрениями, претерпевают разнообразные превращения, обычно это сопровождается переходом растворимых соединений в малорастворимые. Процесс этот достаточно сложный и малоизученный. По мнению О.Г. Ониани, «...несмотря на многочисленные исследования, поведение фосфора в почве все еще остается одной из самых загадочных проблем, стоящих перед исследователями» [114].

5 ВЛИЯНИЕ СИСТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ УДОБРЕНИЯ И ДЕФЕКТА НА УРОЖАЙНОСТЬ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР И ЭНЕРГЕТИЧЕСКУЮ ЭФФЕКТИВНОСТЬ

Изучение влияния различных систем удобрения и дефектата на физико-химические свойства и режим фосфора чернозема выщелоченного проводилось в условиях длительного стационарного опыта, заложенного на территории УНТЦ «Агротехнология» Воронежского государственного аграрного университета в 1987 г. Следовательно на момент начала проведения диссертационного исследования удобрения и дефект вносили уже 28 лет (2015 г.). В отличие от минеральных удобрений, вносимых регулярно, согласно разработанной системе удобрения в опыте, дефект последний раз был внесен в 2005 г., т.е. 10 лет до начала исследований, или 15 лет на момент окончания, поэтому мы наблюдаем прямое действие минеральных удобрений и последствие дефектата. При многолетнем внесении минеральных и органических удобрений в производственных дозах в чернозем выщелоченный проявляется эффект суммации действия, что приводит к подкислению и декальцинированию высокобуферных черноземов. Этот процесс подтвержден и выполненными нами исследованиями. Выявленный эффект, вероятно, связан с проявлением информационных свойств почвы («память» экосистем).

Экспериментальная часть выполнялась в шестой ротации севооборота. Свои опыты мы выполняли на поле № 1 на третьей повторности, с учетом этого в таблице 33 приводим данные по урожайности выращиваемых сельскохозяйственных культур.

Таблица 33 – Урожайность основных сельскохозяйственных культур в опыте, т/га

Варианты опыта	Ячмень	Прибавка урожая, т/га	Озимая пшеница	Прибавка урожая, т/га	Сахарная свекла	Прибавка урожая, т/га
Контроль	2,11	-	2,56	-	30,1	-
Контроль фон (40 т/га навоза)	2,32	0,21	3,25	0,79	35,4	5,3
Фон + N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀	2,97	0,86	4,36	1,80	40,2	10,1
Фон + N ₁₂₀ P ₁₂₀ K ₁₂₀	3,38	1,27	4,59	2,03	41,7	11,6
Фон +дефектат	2,16	0,05	3,33	0,87	33,9	3,8
Дефектат + N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀	3,72	1,61	4,18	1,62	40,5	10,4

Урожай сельскохозяйственных культур отображает почвенные условия, а также культуру земледелия. Варианты отличаются между собой по плодородию. Больше всего это заметно на тех культурах, которые создают большую вегетативную массу – сахарная свекла, культуры на зеленый корм, зерновые. В нашем случае мы используем данные по урожайности озимой пшеницы, ячменя и сахарной свеклы.

Как видно из данных таблицы 33, самая большая прибавка урожая ячменя составила 1,61 т/га, получена на варианте применения дефеката совместно с одинарной дозой минеральных удобрений, а минимальная – на варианте применения дефеката по органическому фону – 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 составила 2,03 т/га, получена на варианте органоминеральной системы удобрения с двойной дозой минеральных удобрений, а минимальная – на варианте органической системы удобрения – 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 органоминеральной системы удобрения с двойной дозой минеральных удобрений – 11,6 т/га, а минимальная – на варианте применения дефеката по органическому фону – 3,8 т/га [143]. Как и в случае с ячменем и озимой пшеницей, удвоение дозы минеральных удобрений не приводит к резкому повышению урожая и сахарной свеклы, прибавка возрастает всего на 0,5 т/га.

Считаем необходимым учитывать то, что на варианте с дефекатом по органическому фону мы наблюдаем его последствие, а на варианте с дефекатом совместно с одинарной дозой минеральных удобрений – последствие дефеката и дозы минеральных удобрений. Тем не менее прибавка урожая от последствия одинарной дозы минеральных удобрений 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.

5.1 Энергетическая эффективность применения удобрений и дефеката

Для оценки эффективности применяемых приемов используются различные методы, из них чаще всего используются экономические, а в последнее время – энергетическая оценка. Энергетическая оценка представляет собой отношение энергии, накопленной в прибавке урожая, к энергозатратам на внесение удобрений, включая их производство. Считаем, что данный метод позволяет более объективно оценивать эффективность применения систем удобрения и дефеката.

Расчеты энергетической эффективности применения удобрений и мелиорантов выполнены по приведенным затратам энергии по методике, изложенной Н.Г. Мязиным [110, 143]. Она основана на расчете биоэнергетического КПД применения удобрения и дефеката по формуле:

$$R = E_{\text{п}}/E_{\text{з}}, \quad (5)$$

где R – энергетическая эффективность, или биоэнергетический КПД применения удобрений;

$E_{\text{п}}$ – энергия, накопленная в прибавке урожая основной продукции, с учетом побочной, МДж;

$E_{\text{з}}$ – энергозатраты на применение удобрений, дефеката и других агрохимикатов, МДж.

Энергозатраты ($E_{\text{з}}$) определяют как сумму энергозатрат на применение всех видов удобрений и мелиорантов в севообороте:

$$E_{\text{з}} = E_{\text{N}} + E_{\text{P}} + E_{\text{K}} + E_{\text{H}} + E_{\text{др}}. \quad (6)$$

Энергозатраты на разные виды удобрений, определяют по справочным данным по формуле:

$$E_{\text{N}} = N \times E_{1,\text{N}}, \quad (7)$$

где N – норма внесения азотного удобрения (и любого другого), кг д.в./га севооборота;

$E_{1,\text{N}}$ – энергозатраты на применение 1 кг д.в. азотного удобрения (либо любого др.).

Рассчитаем энергозатраты на применяемые удобрения.

На органической системе удобрения под озимую пшеницу было внесено 6,7 т/га навоза. Затраты энергии составили $E_H = 6\,700 \times 0,42 = 2\,814$ МДж/га.

Под озимую пшеницу на варианте органоминеральной системы удобрения с одинарной дозой минеральных удобрений было внесено NPK60.

$$E_N = 60 \times 86,6 = 5\,196 \text{ МДж/га};$$

$$E_P = 60 \times 12,6 = 756 \text{ МДж/га};$$

$$E_K = 60 \times 8,3 = 498 \text{ МДж/га};$$

$$\text{плюс } 6,7 \text{ т/га навоза} - E_H = 6\,700 \times 0,42 = 2\,814 \text{ МДж/га.}$$

Суммарные затраты энергии под озимую пшеницу составили:

$$E_3 = E_N + E_P + E_K + E_H = 5\,196 + 756 + 498 + 2\,814 = 9\,264 \text{ МДж/га.}$$

Под озимую пшеницу на варианте органоминеральной системы удобрения с двойной дозой минеральных удобрений было внесено NPK120 и 6,7 т/га навоза.

$$E_N = 120 \times 86,6 = 10\,392 \text{ МДж/га};$$

$$E_P = 120 \times 12,6 = 1\,512 \text{ МДж/га};$$

$$E_P = 120 \times 8,3 = 996 \text{ МДж/га};$$

$$E_H = 6,7 \times 0,42 = 2\,814 \text{ МДж/га};$$

$$E_H = 6\,700 \times 0,42 = 2\,814 \text{ МДж/га.}$$

Суммарные затраты энергии составили:

$$E_3 = E_N + E_P + E_K + E_H = 10\,392 + 1\,512 + 996 + 2\,814 = 15\,714 \text{ МДж/га.}$$

Под озимую пшеницу на варианте с дефекатом было внесено 6,7 т/га навоза, затраты энергии составили $E_H = 6\,700 \times 0,42 = 2\,814$ МДж/га.

Под озимую пшеницу на варианте с дефекатом совместно с одинарной дозой минеральных удобрений внесли NPK60 и 6,7 т/га навоза.

$$E_N = 60 \times 86,6 = 5\,196 \text{ МДж/га};$$

$$E_P = 60 \times 12,6 = 756 \text{ МДж/га};$$

$$E_K = 60 \times 8,3 = 498 \text{ МДж/га};$$

$$\text{плюс } 6,7 \text{ т/га навоза} - E_H = 6\,700 \times 0,42 = 2\,814 \text{ МДж/га.}$$

Суммарные затраты энергии под озимую пшеницу составили:

$$E_3 = E_N + E_P + E_K + E_H = 5\,196 + 756 + 498 + 2\,814 = 9\,264 \text{ МДж/га.}$$

На варианте органической системы удобрения под сахарную свеклу было внесено 6,7 т/га навоза, затраты энергии составили $E_H = 6\,700 \times 0,42 = 2\,814$ МДж/га.

На варианте органоминеральной системы удобрения под сахарную свеклу было внесено NPK60 и 6,7 т/га навоза.

$$E_N = 60 \times 86,6 = 5\,196 \text{ МДж/га};$$

$$E_P = 60 \times 12,6 = 756 \text{ МДж/га};$$

$$E_K = 60 \times 8,3 = 498 \text{ МДж/га};$$

$$\text{плюс } 6,7 \text{ т/га навоза} - E_H = 6\,700 \times 0,42 = 2\,814 \text{ МДж/га.}$$

Суммарные затраты энергии под сахарную свеклу составили:

$$E_3 = E_N + E_P + E_K + E_H = 5\,196 + 756 + 498 + 2\,814 = 9\,264 \text{ МДж/га.}$$

На варианте органоминеральной системы удобрения с двойной дозой минеральных удобрений под сахарную свеклу было внесено NPK120 и 6,7 т/га навоза.

$$E_N = 120 \times 86,6 = 10\,392 \text{ МДж/га};$$

$$E_P = 120 \times 12,6 = 1\,512 \text{ МДж/га};$$

$$E_K = 120 \times 8,3 = 996 \text{ МДж/га};$$

$$E_H = 6\,700 \times 0,42 = 2\,814 \text{ МДж/га.}$$

Суммарные затраты энергии под сахарную свеклу составили:

$$E_3 = E_N + E_P + E_K + E_H = 10\,392 + 1\,512 + 996 + 2\,814 = 15\,714 \text{ МДж/га.}$$

На варианте с дефекатом по органическому фону было внесено 6,7 т/га навоза, затраты энергии составили $E_H = 6\,700 \times 0,42 = 2\,814$ МДж/га.

На варианте с дефекатом совместно с одинарной дозой минеральных удобрений под сахарную свеклу было внесено NPK60 и 6,7 т/га навоза.

$$E_N = 60 \times 86,6 = 5\,196 \text{ МДж/га};$$

$$E_P = 60 \times 12,6 = 756 \text{ МДж/га};$$

$$E_K = 60 \times 8,3 = 498 \text{ МДж/га};$$

$$\text{плюс } 6,7 \text{ т/га навоза} - E_H = 6\,700 \times 0,42 = 2\,814 \text{ МДж/га.}$$

Суммарные затраты энергии под сахарную свеклу составили:

$$E_3 = E_N + E_P + E_K + E_H = 5\,196 + 756 + 498 + 2\,814 = 9\,264 \text{ МДж/га.}$$

На варианте органической системы удобрения под ячмень было внесено 6,7 т/га навоза, затраты составили $E_H = 6\,700 \times 0,42 = 2\,814$ МДж/га.

На варианте органоминеральной системы удобрения с одинарной дозой минеральных удобрений под ячмень было внесено 6,7 т/га навоза и NPK30 и 6,7 т/га навоза.

$$E_N = 30 \times 86,6 = 2\,598 \text{ МДж/га};$$

$$E_P = 30 \times 12,6 = 378 \text{ МДж/га};$$

$$E_K = 30 \times 8,3 = 249 \text{ МДж/га};$$

$$\text{плюс } 6,7 \text{ т/га навоза} - E_H = 6\,700 \times 0,42 = 2\,814 \text{ МДж/га}.$$

Суммарные затраты под ячмень составили:

$$E_3 = E_N + E_P + E_K + E_H = 2\,598 + 378 + 249 + 2\,814 = 6\,034 \text{ МДж/га}.$$

На варианте органоминеральной системы удобрения с двойной дозой минеральных удобрений под ячмень внесено 6,7 т/га навоза и NPK90.

$$E_N = 90 \times 86,6 = 7\,794 \text{ МДж/га};$$

$$E_P = 90 \times 12,6 = 1\,134 \text{ МДж/га};$$

$$E_K = 90 \times 8,3 = 747 \text{ МДж/га};$$

$$\text{плюс } 6,7 \text{ т/га навоза} - E_H = 6\,700 \times 0,42 = 2\,814 \text{ МДж/га}.$$

Суммарные затраты под ячмень составили:

$$E_3 = E_N + E_P + E_K + E_H = 7\,794 + 1\,134 + 747 + 2\,814 = 12\,489 \text{ МДж/га}.$$

На варианте с дефекатом по органическому фону было внесено 6,7 т/га навоза, затраты энергии составили $E_H = 6\,700 \times 0,42 = 2\,814$ МДж/га.

На варианте с дефекатом совместно с одинарной дозой минеральных удобрений под ячмень было внесено 6,7 т/га навоза и NPK30 и 6,7 т/га навоза.

$$E_N = 30 \times 86,6 = 2\,598 \text{ МДж/га};$$

$$E_P = 30 \times 12,6 = 378 \text{ МДж/га};$$

$$E_K = 30 \times 8,3 = 249 \text{ МДж/га};$$

$$\text{плюс } 6,7 \text{ т/га навоза} - E_H = 6\,700 \times 0,42 = 2\,814 \text{ МДж/га}.$$

Суммарные затраты под ячмень составили:

$$E_3 = E_N + E_P + E_K + E_H = 2\,598 + 378 + 249 + 2\,814 = 6\,039 \text{ МДж/га}.$$

Рассчитаем содержание энергии в прибавке урожая по формуле

$$E_{\text{п}} = E_y \times Y_{\text{п}}, \text{ МДж/га} \quad (8)$$

где E_y – содержание энергии в 1 кг основной продукции, МДж/га

$Y_{\text{п}}$ – прибавка урожая, кг/га.

Данные приведены в таблице 33.

При выполнении биоэнергетической оценки используются как фактические данные – величина урожая, прибавка урожая, справочные данные. Установлено, что правильнее производить расчеты КПД по каждой культуре и в целом по севообороту.

Биоэнергетический КПД применения удобрений по прибавке основной продукции в стране составил:

- озимая пшеница – 1,54;
- озимая рожь – 1,49;
- яровая пшеница – 1,29;
- ячмень – 1,76;
- кукуруза на зерно – 1,87;
- сахарной свеклы – 1,95;
- среднее значение – 1,19.

Определение биоэнергетического КПД выполнено для основных культур шестипольного севооборота – озимой пшеницы, сахарной свеклы и ячменя. Результаты исследования представлены в таблице 34.

Таблица 34 – Количество энергии в прибавке, МДж

Варианты опыта	Прибавка урожая, т/га, ячмень	Количество энергии в прибавке, МДж	Прибавка урожая, т/га, оз. пшеница	Количество энергии в прибавке, МДж	Прибавка урожая, т/га, сах. свекла	Количество энергии в прибавке, МДж
Контроль	–	–	–	–	–	–
Фон (40 т/га навоза)	0,21	3454,5	0,79	12995,5	5,3	13568
Фон + N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀	0,86	14147	1,80	29610	10,1	25856
Фон + N ₁₂₀ P ₁₂₀ K ₁₂₀	1,27	20891,5	2,03	33393,5	11,6	29696
Фон + дефекаат	0,05	82,2	0,87	14311,5	3,8	9728
Дефекаат + N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀	1,61	26484,5	1,62	26649	10,4	26624

Все расчеты выполнены по третьей повторности опыта, с которой отбирались образцы почв на анализ, поэтому полученные нами результаты считаем вполне корректными. Как следует из приведенных в таблице 34 данных, на всех удобренных вариантах опыта получены прибавки урожаев, изучаемых сельскохозяйственных культур, и соответственно есть добавочная энергия в них. Так, по ячменю минимальная прибавка энергии получена на варианте применения дефеката по органическому фону. Это обусловлено тем, что мы наблюдаем последствие дефеката. На варианте применения дефеката совместно с одинарной дозой минеральных удобрений получена максимальная прибавка энергии. По озимой пшенице максимальная прибавка энергии наблюдается на варианте органоминеральной системы удобрения с двойной дозой минеральных удобрений, а минимальная – на варианте органической системы удобрения. По сахарной свекле максимальная прибавка энергии получена на варианте органоминеральной системы удобрения с двойной дозой минеральных удобрений, а минимальная – на варианте применения дефеката по органическому фону.

Однако полученные данные не позволяют утверждать, что наиболее выгодным является вариант органоминеральной системы удобрения с двойной дозой минеральных удобрений. Это подтверждается данными расчетов энергетической эффективности, приведенными в таблице 35.

Таблица 35 – Энергетическая эффективность удобрений и дефеката

Варианты опыта	Озимая пшеница			Сахарная свекла			Ячмень			Средний, R
	E _п	E _з	R	E _п	E _з	R	E _п	E _з	R	
Контроль	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Фон 40 т/га навоза	12 995	2 814	4,62	13 568	2 814	4,82	3 454	2 814	1,23	3,56
Фон + NPK(60)	29 610	9 264	3,20	25 856	9 264	2,79	14 147	6 034	2,34	2,78
Фон + NPK(120)	33 393	15 714	2,12	29 696	15 714	1,89	20 891	14 489	1,45	1,82
Фон + дефекат	14 311	2 814	5,09	9 728	2 814	3,46	82	2 814	0,03	2,86
Дефекат + NPK	26 649	9 264	2,88	26 624	9 264	2,88	26 484	6 039	4,38	3,38
Средний R	–	–	3,58	–	–	3,17	–	–	1,89	–

Как следует из полученных данных, максимальная энергетическая эффективность наблюдается по органической системе удобрения, R = 3,56, незначительно ниже она на варианте применения дефеката совместно с одинарной дозой

минеральных удобрений – $R = 3,38$. Удвоение дозы минеральных удобрений на варианте органоминеральной системы удобрения снижает энергетическую эффективность по озимой пшенице с 2,78 до 1,82, т.е. в 1,5 раза. Это снижение наблюдается для сахарной свеклы и ячменя. Максимальная энергетическая эффективность применения удобрений и дефектата установлена по озимой пшенице – $R = 3,58$, а минимальная по ячменю – $R = 1,89$. Выявленные закономерности наглядно иллюстрируют данные рисунка 42.

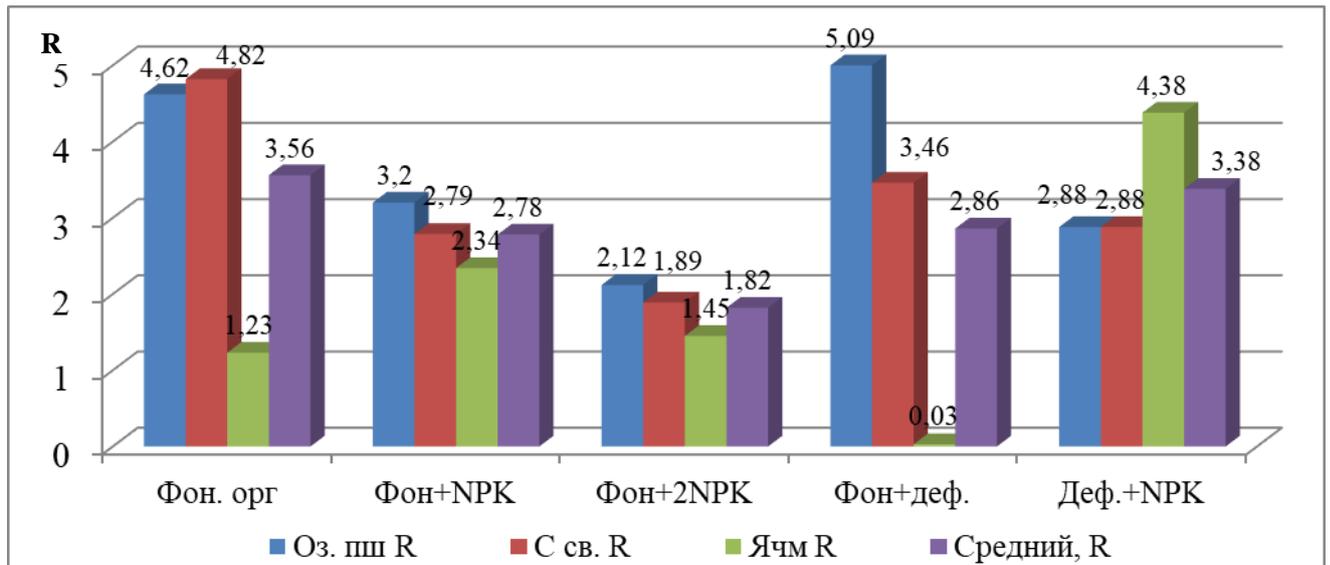


Рисунок 42 – Энергетическая эффективность применения удобрений и дефектата в опыте

Следует отметить, что в принципе все три культуры отзывчивы на удобрения и дефектат. Только очень низкая прибавка по ячменю на варианте применения дефектата по органическому фону несколько искажает общую закономерность. Ведь на варианте применения дефектата совместно с одинарной дозой минеральных удобрений мы видим резкий рост энергетической эффективности по ячменю, очень отзывчивой культуре на внесение удобрений.

Считаем очень убедительным фактом резкий рост энергетической эффективности всех культур на вариантах применения дефектата, по сравнению с удобренными вариантами, особенно с органоминеральной системой удобрения. Озимая пшеница и особенно сахарная свекла очень чувствительны к реакции среды, а на вариантах применения дефектата она была наиболее благоприятной во все годы наблюдений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В связи с тем, что уже длительное время применяются различные системы удобрений, это 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 абсолютного 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 дефекатам относительное накопление ортофосфатов более выражено по сравнению со всеми другими вариантами. В отдельные годы на варианте применения дефекатам совместно с NPK по 60 кг д.в. на 1 га минерального фосфора в пахотном слое несколько выше, чем органического, но вниз по профилю доля последнего заметно возрастает. Это связано с повышением pH 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 абсолютного контроля 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 минеральных удобрений NPK по 60 кг д.в. на 1 га, вносимых по органическому фону, повышает содержание всех форм фосфора до 35–92 мг/кг, а среднее их количество достигает 67 мг/кг, амплитуда колебаний – 57 мг/кг.

При внесении минеральных удобрений NPK по 120 кг д.в. на 1 га (т.е. двойная доза минеральных удобрений) по органическому 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.

Выявлено, что среднее содержание этих форм фосфора за ротацию севооборота практически одинаково на вариантах внесения одинарной и двойной дозы минеральных удобрений по органическому фону. Это можно объяснить внесением фосфора как по органическому 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 органического фона. На варианте применения дефеката по органическому фону содержание обменного фосфора и ортофосфатов в пахотном слое варьировало в пределах 35–64 мг/кг при среднем содержании 49 мг/кг, амплитуда колебаний – 29 мг/кг.

На варианте применения дефеката совместно с одинарной дозой минеральных удобрений содержание изучаемых форм фосфора в пахотном слое изменялось в пределах 24–76 мг/кг при среднем содержании 50 мг/кг, амплитуда колебаний – 51 мг/кг. Соответственно на вариантах применения дефеката по органическому фону, абсолютного контроля, внесения двойной дозы минеральных удобрений по органическому фону, органического фона, применения дефеката совместно с одинарной дозой минеральных удобрений и с одинарной дозой минеральных удобрений, содержание изучаемых форм фосфора образует следующий ряд: 29, 34, 35, 43, 50 и 50 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 абсолютном контроле 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 органического фона оно выше – 41 и 13 мг/кг соответственно, или 63,1 и 92,9%. На варианте внесения одинарной дозы минеральных удобрений по органическому фону это снижение составило 37 и 13 мг/кг, или 51,4 и 92,9% соответственно, то есть потери фосфора на вариантах органического фона и с одинарной дозой минеральных удобрений близки.

На варианте внесения двойной дозы минеральных удобрений по органическому фону 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 применения дефеката по органическому фону 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 применения дефеката с одинарной дозой минеральных удобрений это снижение составило 30 и 13 мг/кг, или 47,6 и 100,0%.

8. Внесение удобрений и дефеката способствует повышению коэффициента изменения валового содержания (Кр) и степени подвижности (КСПр) фосфора. В наибольшей степени это проявляется на варианте внесения двойной дозы минеральных удобрений. Эффект от внесения дефеката сравним с внесением навоза или превышает его. Подобная закономерность наблюдается и по изменению величины показателя характера фосфатного режима (Пр).

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.

9. Внесение органических, органоминеральных удобрений и дониза по-
вышает и стабилизирует урожаи сельскохозяйственных культур. Максимальные
прибавки урожая выявлены на варианте внесения двойной дозы минеральных
удобрений по органическому фону, составившие 1,27 т/га по ячменю, 2,03 т/га по
озимой пшенице и 11,6 т/га по сахарной свекле.

Минимальные прибавки урожая установлены на варианте применения де-
феката по органическому фону по ячменю – 0,05 т/га и сахарной свекле – 3,8 т/га
и на варианте органического фона по озимой пшенице – 0,73 т/га.

10. Максимальная энергетическая эффективность установлена по органиче-
ской системе удобрения, $R = 3,56$, незначительно ниже она на варианте приме-
нения дониза совместно с одинарной дозой минеральных удобрений – $R = 3,38$.
Удвоение дозы минеральных удобрений на варианте органоминеральной системы
удобрения снижает энергетическую эффективность 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
дониза установлена по озимой пшенице – $R = 3,58$, а минимальная по ячменю –
 $R = 1,89$.

РЕКОМЕНДАЦИИ ПРОИЗВОДСТВУ

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

Для сокращения затрат на известкование и с учетом длительного последей-
ствия дониза можно известковать один раз за две ротации севооборота.

Длительное последействие дониза стабилизирует режим фосфатов в чер-
ноземе выщелоченном, поэтому следует использовать как последействие, 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 органофила на запасы и характер распределения по профилю органофосфатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агробиологический цикл фосфора / А.Л. Иванов, В.Г. Сычев, Л.М. Державин, С.Н. Адрианов и др.; под редакцией академика А.Л. Иванова. – Москва: Россельхозакадемия, 2012. – 512 с.
2. Агроклиматический справочник по Воронежской области. – Ленинград, 1958. – 166 с.
3. Агрохимические методы исследования почв. – Москва: Изд-во АН СССР, 1960. – 555 с.
4. Адерихин, П.Г. Влияние удобрений на физико-химические свойства и фосфатный режим типичных черноземов / П.Г. Адерихин, Ю.Г. Чурилина // Вопросы изучения почв, повышения их плодородия и эффективного применения удобрений. – Куйбышев, 1972. – С. 201–203.
5. Адерихин, П.Г. Динамика поглощения фосфорной кислоты почвами / П.Г. Адерихин // Тр. Воронежского ун-та. – Воронеж, 1956. – Т. 56, Вып. 3. – С. 31–37.
6. Адерихин П.Г. Роль обменных катионов в поглощении фосфорной кислоты черноземами / П.Г. Адерихин // Почвоведение. – 1949. – № 5. – С. 302–305.
7. Адерихин, П.Г. Фосфор в почвах и земледелии Центрально-Черноземной полосы / П.Г. Адерихин. – Воронеж, 1970. – 248 с.
8. Адерихин, П.Г. Роль механических фракций в поглощении фосфорной кислоты почвами / П.Г. Адерихин, Е.П. Петрова // Почвоведение. – 1952. – № 2. – С. 156–160.
9. Айсанов, Т.С. Влияние систем удобрения на кислотно-основные показатели чернозема выщелоченного и продуктивность озимой пшеницы: дис. ... канд. с.-х. наук: 06.01.04 / Т.С. Айсанов. – Ставрополь, 2015. – 224 с.
10. Акулов, П.Г. Основные свойства черноземов Центрально-Черноземной России / П.Г. Акулов, Б.Ф. Азаров, В.Д. Соловиченко // В кн.: Плодородие черноземов России. – Москва, 1998. – С. 340–363.
11. Андреюк, Е.И. Почвенные микроорганизмы и интенсивное земледелие / Е.И. Андреюк, Г.А. Иутинская, А.Н. Дульгеров. – Киев: Наукова думка, 1988. – 215 с.

12. Анохина, Н.С. Влияние приемов основной обработки почвы и удобрений на гумусное состояние и ферментативную активность чернозема выщелоченного южной лесостепи Республики Башкортостана: дис. ... канд. с.-х. наук: 06.01.01 / Н.С. Анохина. – Уфа, 2011. – 126 с.
13. Аскинази, Д.Л. Минеральные формы фосфора в почве и методы их определения / Д.Л. Аскинази, К.Е. Гинзбург, Д.С. Лебедева // Почвоведению – 1963. – № 5. – С. 20–24.
14. Аскинази, Д.Л. Роль глинистых минералов почвы в поглощении ионов фосфорной кислоты. / Д.Л. Аскинази, К.Е. Гинзбург // Труды Почвенного ин-та им. В.В. Докучаева, 1950. – Т. 33. – С. 18–23.
15. Аскинази, Д.Л. Фосфатный режим и известкование почв с кислой реакцией. – Москва; Ленинград: Изд-во АН СССР, 1949. – 63 с.
16. Ахтырцев, А.Б. Лугово-черноземные почвы центральных областей Русской равнины / А.Б. Ахтырцев, П.Г. Адерихин, Б.П. Ахтырцев. – Воронеж: Изд-во Воронежского ун-та, 1981. – 176 с.
17. Ахтырцев, Б.П. Почвенный покров Среднерусского Черноземья / Б.П. Ахтырцев, А.Б. Ахтырцев. – Воронеж: Изд-во ВГУ, 1993. – 213 с.
18. Ашрам Мазен Джумах. Содержание органических соединений фосфора в выщелоченном черноземе при длительном применении разных систем удобрения в условиях центрального черноземного региона / Ашрам Мазен Джумах, И.Н. Донских, Н.Г. Мязин, К.Е. Стекольников // Состав и свойства почв: материалы междунар. науч. конф., посвященной 145-летию со дня рождения академика К.Д. Глинки (Санкт-Петербург, 22–23 ноября 2012 г.). – Санкт-Петербург, 2012. – С. 59–61.
19. Бабарина, Э.А. Фосфатный режим дерново-подзолистых почв в длительных опытах / Э.А. Бабарина, Н.М. Мельникова // Агрехимия. – 1987. – № 11. – С. 38–44.
20. Блэк, К.А. Растение и почва / К.А. Блэк. – Москва: Колос, 1973. – 502 с.
21. Богданов, Н.И. Валовой и органический фосфор в сибирских черноземах / Н.И. Богданов // Почвоведение. – 1954. – № 5. – С. 27–37.

22. Брехова, Л.И. Формы соединений фосфора в почвах сопряженного ряда / Л.И. Брехова, Д.И. Щеглов, Т.В. Шереметова // Современные проблемы сохранения плодородия черноземов (к 130-летию выхода в свет книги В.В. Докучаева «Русский чернозем»). – Каменная степь, 2013. – С. 218.
23. Вальтер, Г. Растительность земного шара / Г. Вальтер. – Москва: Прогресс, 1968. – 551 с.
24. Возбуцкая, А.Е. Химия почв / А.Е. Вобуцкая. Москва: Высшая школа, 1968. – 427 с.
25. Войкин, Л.М. Влияние окультуривания почв на групповой состав фосфатов в Среднем Поволжье / Л.М. Войкин, Ю.Б. Андреев, Н.С. Кирикова // Почвоведение. – 1976. – № 5. – С. 77–86.
26. Войкин, Л.М. Формы фосфатов в основных почвообразующих породах Поволжья / Л.М. Войкин, А.С. Фатьянов // Почвоведение. – 1972. – № 2. – С. 49–54.
27. Воробьева, Л.А. О возможности прогноза состояния некоторых химических элементов в природных водных растворах по диаграммам растворимости / Л.А. Воробьева, Л.Л. Новых, Т.А. Рудакова // Вестник МГУ. Серия 17. Почвоведение. – 1981. – № 4. – С. 3–12.
28. Временные рекомендации по составлению проектно-сметной документации на комплексное агрохимическое окультуривание полей в Централно-Черноземном экономическом районе. – Воронеж, 1983. – 70 с.
29. Галеева, Л.П. Гумусное состояние и биологическая продуктивность черноземов выщелоченных в агроценозах / Л.П. Галеева // Вестник НГАУ. – 2012. – № 1. – С. 10–16.
30. Гамзиков, Г.П. Агрохимия и экология длительного систематического применения удобрений в агроценозах / Г.П. Гамзиков // Почва – национальное достояние России: материалы IV Докучаевского общества почвоведов. – Новосибирск, 2004. – С. 268.
31. Ганжара, Н.Ф. Почвоведение / Н.Ф. Ганжара. – Москва: Агроконсалт, 2001. – 392 с.

32. Гапон, Е.Н. Обменные реакции почв / Е.Н. Гапон // Почвоведение. – 1934. – № 2. – С. 11–12.
33. Гедройц, К.К. Избранные сочинения / К.К. Гедройц. – Москва, 1955. – Т. 3. – 560 с.
34. Гедройц, К.К. Материалы к познанию поглотительной способности почв. 1. Скорость поглощения, емкость поглощения, энергия поглощения и вытеснения / К.К. Гедройц // ЖОА. – 1918. – Т. XIX. – С. 269–332.
35. Геммерлинг, В.В. К характеристике соединений фосфора в почвах разного типа / В.В. Геммерлинг // Почвоведение. – 1941. – № 6. – С. 11–14.
36. Гинзбург, К.Е. Методика определения минеральных форм фосфора в почвах / К.Е. Гинзбург, Л.С. Лебедева // Агрохимия. – 1971. – № 1. – С. 25–36.
37. Гинзбург, К.Е. Значение полутораокисей и гуматов в поглощении фосфора почвами / К.Е. Гинзбург // Труды Почвенного ин-та им. В.В. Докучаева. – 1960. – Т. 55. – С. 239–271.
38. Гинзбург, К.Е. Фосфор основных типов почв СССР / К.Е. Гинзбург. – Москва: Наука, 1981. – С. 35.
39. Гладкова, К.Ф. Действие длительного внесения удобрений на накопление в дерново-подзолистой почве запасов усвояемых форм фосфора и калия / К.Ф. Гладкова // Фосфорные удобрения и питание растений. – Москва: Изд-во с.-х. лит-ры, журналов и плакатов, 1963. – С. 75–88.
40. Глазунова, Н.М. Извлечение фосфора последовательными солевыми вытяжками / Н.М. Глазунова // Бюл. ВИУА. – 1976. – № 28. – С. 20–22.
41. Глинка, К.Д. Геология и почвы Воронежской губернии / К.Д. Глинка. – Воронеж. Ком. Наркомзема Средне-Черноземной обл., 1921. – 60 с.
42. Горбунов, Н.И. Минералогия и физическая химия почв / Н.И. Горбунов. – Москва: Наука, 1978. – 294 с.
43. ГОСТ 26212-91. Почвы. Определение гидролитической кислотности по методу Каппена в модификации ЦИНАО. – Москва: Изд-во стандартов, 1993. – 8 с.
44. ГОСТ 26483-85. Почвы. Определение рН солевой вытяжки, обменной

кислотности, обменных катионов, содержания нитратов и обменного аммония и подвижной серы методами ЦИНАО. – Москва: Изд-во стандартов, 1994. – 4 с.

45. Державин, Л.М. Плодородие почв и пути его повышения / Л.М. Державин. – Москва: Колос, 1983. – 43 с.

46. Дмитренко, П.А. О содержании фосфора в органической части почвы / П.А. Дмитренко // Почвоведение. – 1948. – № 8. – С. 495–501.

47. Драчев, С.М. К изучению мобильности фосфатов почвы / С.М. Драчев // Научно-агрономический журнал. – 1928. – № 9. – С. 587–601.

48. Дроздов, К.А. Ландшафты долин Поосколья / К.А. Дроздов // В кн.: Поосколье. – Воронеж, 1980. – С. 38–75.

49. Дубянский, А.А. Геология и подземные воды северной части Воронежской губернии / А.А. Дубянский, А. Скорин. – Воронеж, 1939. – 25 с.

50. Дубянский, А.А. Новые данные о геологии Воронежской губернии / А.А. Дубянский. – Воронеж, 1927. – 118 с.

51. Дубянский, с сотр. 1961.

52. Дуда, Г.Г. Влияние механического состава почвы на содержание элементов питания и эффективность удобрений в Степной зоне УССР / Г.Г. Дуда, М.М. Сонько, А.Г. Мусатов // Почвоведение. – 1973. – № 7. – С. 42–49.

53. Душечкин, А.И. Формы фосфора в почве и отзывчивость почв на фосфорные удобрения / А.И. Душечкин // Удобрения и урожай. – 1929. – № 4. – С. 18–22.

54. Душечкин, А.И. Дальнейшее исследование о биологическом поглощении фосфорной кислоты в почве / А.И. Душечкин // Труды сети оп. полей о-ва сахарозаводчиков. – 1914.

55. Дюшофур, Ф. Основы почвоведения. Эволюция почв / Ф. Дюшофур. – Москва: Прогресс, 1970. – 591 с.

56. Егоров, М.А. Известь и фосфорная кислота в почве / М.А. Егоров // Труды НИУ. – 1926. – Вып. 34.

57. Ежов, И.Н. Геология / И.Н. Ежов // Воронежская область. – Воронеж, 1952. – С. 14–34.

58. Ежов, И.Н. Геоморфологические районы Центральных Черноземных областей / И.Н. Ежов // Труды Воронеж. гос. ун-та. – 1957. – Т. 37. – С. 67–111.
59. Елешев, Р.Е. Сорбция фосфатов отдельными компонентами почвы / Р.Е. Елешев, А.Л. Иванов, М. Шахджахан // Агрохимия. – 1992. – № 11. – С. 32–38.
60. Елешев, Р.Е. Фосфорные удобрения и урожай / Р.Е. Елешев. – Алма-Ата: Кайнар, 1984. – 159 с.
61. Елешев, Р.Е. Формы фосфатов в орошаемых почвах юго-восточного Казахстана и приемы рационального использования фосфорных удобрений: дис. ... д-ра с.-х. наук: 06.01.04 / Р. Е. Елешев. – Алма-Ата, 1983. – 312 с.
62. Емнова, Е.Е. Влияние фосфорных и стартовых доз азотных удобрений на фосфатазную активность в ризосферной почве и нелигнифицированных корнях сои в условиях засухи / Е.Е. Емнова, О.В. Дарабан, Я.В. Бизган, С.И. Тома // Почвоведение. – 2014. – № 2. – С. 217–225.
63. Иенни, Г.И. Факторы почвообразования / Г. Иени. – Москва: ИЛ, 1948. – 347 с.
64. Камышев, Н.С. Растительный покров Воронежской области и его охрана / Н.С. Камышев, К.Ф. Хмелев. – Воронеж: Изд-во ВГУ, 1978. – 184 с.
65. Канунникова, Н.А. О фосфатном потенциале почв / Н.А. Канунникова // Почвоведение. – 1985. – № 7. – С. 22–30.
66. Канунникова, Н.А. Термодинамические потенциалы почвенных реакций и буферные свойства почв / Н.А. Канунникова // Итоги науки и техники. Почвоведение и агрохимия. – Москва: ВИНТИ, 1986. – Т. 6. – С. 87–186.
67. Карпинский, Н.П. Фосфатный уровень почвы / Н.П. Карпинский, В.Б. Замятина // Почвоведение. – 1958. – № 2. – С. 27.
68. Карпинский, Н.П. Подвижные фосфаты почвы, их доступность растениям и действие удобрений / Н.П. Карпинский, Н.М. Глазунова // Основные условия эффективного применения удобрений. – Москва, 1983. – С. 193–203.
69. Карпинский, Н.П. Термодинамика почвенных фосфатов и фосфатный потенциал / Н.П. Карпинский // Труды X Международного конгресса почвоведов. – Москва: Наука, 1974. – С. 21–28.

70. Карпинский, Н.П. Фосфорная кислота, связанная с органическим веществом почвы / Н.П., Карпинский, В.Б. Замятина // Труды ВИУА. – 1933. – Вып. 2. – С. 12–15.
71. Касицкий, Ю.И. Агрохимические аспекты решения проблемы фосфора в земледелии СССР / Ю.И. Касицкий // Агрохимия. – 1983. – № 10. – С. 10–12.
72. Касицкий, Ю.М. Общие вопросы установления оптимального содержания подвижного фосфора в почвах / Ю.М. Касицкий // Агрохимия. – 1988. – № 10. – С. 129–140.
73. Кедров-Зихман О.К. О влиянии извести на процесс мобилизации фосфорной кислоты в почве / О.К. Кедров-Зихман // Научно-агрономический журнал. – 1928. – № 3. – С. 157–170.
74. Кемаев, А.И. Трансформация фосфора удобрения в осушенных низинных торфяных почвах: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук: 06.01.04 / А.И. Кемаев. – Санкт-Петербург, 2000. – 19 с.
75. Кирюшин, В.И. Агрономическое почвоведение / В.И. Кирюшин. – Санкт-Петербург: КВАДРО, 2013. – 165 с.
76. Кирюшин, В.И. Экологизация земледелия и технологическая политика / В.И. Кирюшин. – Москва: Изд-во МСХА, 2000. – 473 с.
77. Кирюшин, В.И. Экологические основы земледелия / В.И. Кирюшин. – Москва: Колос, 1996. – 336 с.
78. Ковда, В.А. Биогеохимия почвенного покрова / В.А. Ковда. – Москва: Наука, 1985. – С. 159–179.
79. Ковда, В.А. Основы учения о почвах / В.А. Ковда. – Москва: Наука, 1973. – Т. 2. – 468 с.
80. Ковда, В.А. Прошлое и будущее чернозема / В.А. Ковда // В кн. Русский чернозем. 100 лет после Докучаева. – Москва: Наука, 1983. – С. 253–280.
81. Колянда, Н.К. Формирование фосфатного фонда почвы при систематическом применении удобрений в севообороте и на бессменных посевах / Н.К. Колянда // Агрохимия. – 1971. – № 6. – С. 3–14.
82. Костычев, П.А. Нерастворимые фосфорнокислые соединения почв /

П.А. Костычев. – Санкт-Петербург, 1881. – 74 с.

83. Красильников, Н.А. Микроорганизмы почвы и высшие растения / Н.А. Красильников. – Москва: Изд-во АН СССР, 1958. – 464 с.

84. Кривоносова, Г.М. Содержание и формы органических фосфатов в почвах степной зоны Украины / Г.М. Кривоносова, Т.В. Басевич // Почвоведение. – 1980. – № 5. – С. 135–139.

85. Крупский, Н.К. Формы фосфатов при длительном внесении удобрений на черноземах, темно-серой и дерново-подзолистой почвах / Н.К. Крупский, З.И. Лукьянчикова // Агрохимия. – 1970. – № 9. – С. 11–27.

86. Кудеяров, В.Н. Почвенные процессы и пространственно-временная организация почв / В.Н. Кудеяров. – Москва: Наука, 2006. – 568 с.

87. Кудеярова, А.Ю. Влияние фосфорных удобрений на вертикальный перенос фосфора, органического углерода и металлов в серой лесной почве / А.Ю. Кудеярова // Почвоведение. – 1989. – № 1. – С. 31–41.

88. Кудеярова, А.Ю. Минеральные фосфорсодержащие соединения в почвах / А.Ю. Кудеярова // Известия АН СССР. Серия Биология. – 1982. – № 4. – С. 549–558.

89. Кудеярова, А.Ю. О фосфатном потенциале почв / А.Ю. Кудеярова // Агрохимия. – 1968. – С. 60–67.

90. Кудеярова, А.Ю. Педохимия орто- и педофосфатов в условиях применения удобрений / А.Ю. Кудеярова. – Москва: Наука, 1993. – 240 с.

91. Кудеярова, А.Ю. Полифосфаты в почве / А.Ю. Кудеярова // Почвоведение. – 1983. – № 8. – С. 41–47.

92. Кудеярова, А.Ю. Фосфатогенная трансформация почв. – Москва: Наука, 1995. – 288 с.

93. Кудрин, С.А. Содержание и подвижность фосфатов в сероземах на различных материнских породах / С.А. Кудрин // Почвоведение. – 1942. – № 5–6.

94. Кузелев, М.Н. Трансформация соединений органического углерода и фосфора в обыкновенных черноземах Каменной степи под влиянием антропогенеза: дис. ... канд. с.-х. наук: 06.01.04 / М.Н. Кузелев. – Москва, 2008. – 166 с.

95. Кук, Д.У. Регулирование плодородия почв / Д.У. Кук. – Москва: Колос, 1970. – 520 с.
96. Кулаковская, Т.Н. Оптимизация агрохимической системы почвенного питания растений / Т.Н. Кулаковская. – Москва: Агропромиздат, 1990. – 219 с.
97. Купревич, В.Ф. Вопросы почвенной энзимологии / В.Ф. Купревич // Вестник АН СССР. – 1958. – Вып. 4. – С. 22–29.
98. Лешков, А.П. Фосфаты в степных почвах Алтайского края / А.П. Лешков, А.Я. Жежер, Н.В. Ищенко // Почвоведение. – 1977. – № 7. – С. 54–59.
99. Лурье, Ю.Ю. Справочник по аналитической химии / Ю.Ю. Лурье. – Москва: Госхимиздат, 1962. – 287 с.
100. Макаров, М.И. Фосфор органического вещества почв / М.И. Макаров. – Москва: Геос, 2009. – 397 с.
101. Маккелви, В.Е. Распространенность и распределение фосфора в литосфере / В.Е. Маккелви // Фосфор в окружающей среде. – Москва: Мир, 1977. – С. 24–46.
102. Менделеев, Д.И. Отчет об опытах 1867–69 годов / Д.И. Менделеев. – Сочинения, Т. XIX. – С. 415–437.
103. Методические указания по проведению комплексного мониторинга плодородия почв земель сельскохозяйственного назначения. Москва: ФГНУ «Росинформагротех», 2003. – 240 с.
104. Мильков, Ф.Н. Ландшафтные зоны, провинции и районы центральных черноземных областей / Ф.Н. Мильков // Центральные Черноземные области. – Москва, 1952. – С. 113–148.
105. Мильков, Ф.Н. Типологические ландшафтные комплексы Среднерусской лесостепи / Ф.Н. Мильков // Вопросы ландшафтно-типологического картирования. – Воронеж, 1959. – С. 5–23.
106. Минеев, В.Г. Практикум по агрохимии: учеб. пос. / В.Г. Минеев. – 2-е изд. перераб. и доп.; под ред. академика РАСХН В.Г. Минеева. – Москва: Изд-во МГУ, 2001. – 689 с.
107. Минеев, В.Г. Химизация земледелия и природная среда / В.Г. Минеев. – Москва: Агропромиздат, 1990. – 287 с.

108. Муха, В.Д. Естественно-антропогенная эволюция почв (общие закономерности и зональные особенности) / В.Д. Муха. – Москва: Колос, 2004. – 271 с.
109. Муха, В.Д. Почвенные анализы (Практикум по почвоведению) / В.Д. Муха, А.Ф. Сулима. – Курск: Изд-во Курской ГСХА, 2010. – 237 с.
110. Мязин, Н.Г. Система удобрения: учебное пособие / Н.Г. Мязин. – Воронеж: ФГБОУВО Воронежский ГАУ, 2009. – 350 с.
111. Наконечная, М.А. «Природные» и «остаточные» фосфаты дерново-подзолистых почв и их доступность растениям: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук: 06.01.04 / М.А. Наконечная. – Москва: ВИУА, 1979. – 22 с.
112. Небольсин, А.Н. Научная концепция известкования почв при современном уровне знаний / А.Н. Небольсин, З.П. Небольсина // Вопросы известкования почв. – Москва: ВИУА, 2002. – С. 132–134.
113. Небольсин, А.Н. Теоретические основы известкования почв / А.Н. Небольсин, З.П. Небольсина. – Санкт-Петербург, 2005. – 252 с.
114. Ониани, О.Г. Фосфатный режим кислых почв и применение фосфорных удобрений на чайных плантациях Грузии / О.Г. Ониани. – Тбилиси, 1974. – 42 с.
115. Орлов, Д.С. О возможности использования некоторых биохимических показателей для диагностики и индикации почв / Д.С. Орлов // Проблемы и методы биологической индикации и диагностики почв. – Москва: Изд-во МГУ, 1980. – С. 4–21.
116. Орлов, Д.С. О некоторых показателях биологической активности почв и вторичной трансформации гумусовых кислот / Д.С. Орлов, О.Н. Бирюкова // Экологические условия и ферментативная активность почв. – 1979. – С. 78–99.
117. Орлов, Д.С. Потенциальная буферная способность по отношению к фосфатам главных типов почв / Д.С. Орлов, Е.В. Горшкова, М.М. Салах, Е.В. Терская // Агрохимия. – 1993. – № 12. – С. 3–9.
118. Орлов, Д.С. Химия почв / Д.С. Орлов. – Москва: Изд-во МГУ, 1992. – 400 с.
119. Орлов, Д.С. Химия почв: учебник для студентов вузов, обучающихся

по специальности «Агрохимия и почвоведение» / Д.С. Орлов, Л.К. Садовникова, Н.И. Суханова. – Москва: Высшая школа, 2005. – 557 с.

120. Павлихина, А.В. Формы и сорбция фосфатов в пахотных и целинных дерново-подзолистых почвах южной части московской области: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук: 06.01.04 / А.В. Павлихина. – Москва, 1971. – 23 с.

121. Пейве, Я.В. Биохимия почв / Я.В. Пейве. – Москва: Сельхозгиз, 1961. – 421 с.

122. Перечень показателей физико-химического состояния почв // Методические указания МУ 2.1.7.730-99. – Москва: Стандартиформ, 199. – 14 с.

123. Петербургский, А.В. Круговорот и баланс питательных веществ в земледелии / А.В. Петербургский. – Москва: Наука, 1979. – 168 с.

124. Петербургский, А.В. Фосфорные удобрения. Агрохимия / А.В. Петербургский. – 4-е изд. – Москва: Колос, 1975. – С. 198–241.

125. Попович, Л.П. Фосфатное состояние почвы / Л.П. Попович // Почвоведение. – 1992. – № 11. – С. 24–35.

126. Поставская, С.М. О минеральных фосфатах чернозема Западной Сибири / С.М. Поставская, Г.П. Гамзиков // Почвоведение. – 1975. – № 1. – С. 93–101.

127. Постников, А.В. Применение удобрений, баланс питательных веществ и изменение химических свойств почв / А.В. Постников // Агрохимия. – 1976. – № 12. – С. 3–14.

128. Почвообразовательные процессы / Российская акад. с.-х. наук, Почвенный ин-т им. В. В. Докучаева; отв. ред. М.С. Симакова, В.Д. Тонконогов. – Москва: Почвенный ин-т, 2006. – 509 с.

129. Практикум по агрохимии ; под ред. В.Г. Минеева. – Москва: Изд-во МГУ, 2001. – 180 с.

130. Прянишников, Д.Н. Кислотность почвы и ее значение при известковании и применении фосфорита / Д.Н. Прянишников // Биохимия. – 1928. – Вып. 193. – С. 211–215.

131. Прянишников, Д.Н. Агрохимия. Избранные сочинения / Д.Н. Прянишников. – Т. 1. – Москва: Гос. Изд-во с.-х. лит-ры, 1952. – 691 с.

132. Раскатов, Г.И. Геоморфология и неотектоника территории Воронежской антеклизы / Г.И. Раскатов. – Воронеж: Изд-во Воронежского ун-та. 1969. – 163 с.
133. Салах, Махмуд Мохамед. Фосфатный потенциал и потенциальная буферная способность по отношению к фосфору главных типов почв: автореф. дис. ... канд. биол. наук: 06.01.03 / Салах Махмуд Мохамед. – Кишинев, 1988. – 24 с.
134. Салманов, А.Б. Минеральные формы фосфора в орошаемых почвах Дагестана / А.Б. Салманов, Л.А. Зеленцова // Почвоведение. – 1976. – № 7. – С. 61–68.
135. Самойлова, Е.М. Почвообразующие породы / Е.М. Самойлова. – Москва: Изд-во МГУ, 1991. – 176 с.
136. Свистова, И.Д. Влияние агрофитоценоза на формирование микробного комплекса выщелоченного чернозема / И.Д. Свистова, А.П. Щербаков, Л.А. Фролова // Сельскохозяйственная биология. Серия Растениеводство. – 2003. – № 5. – С. 217–223.
137. Словарь-справочник по агропочвоведению; под ред. Иванова В.Д. – Воронеж: Центр духовного возрождения Черноземного края, 1999. – 400 с.
138. Снакин, В.В. Состав жидкой фазы почв / В.В. Снакин, А.А. Присяжная, О.В. Рухович. – Москва: Изд-во РЭФИА, 1997. – С. 125–126.
139. Соколов, А.В. Агрохимия фосфора / А.В. Соколов. – Москва-Ленинград: Изд-во АН СССР, 1950. – 151 с.
140. Соколов, А.В. Запасы в почвах усвояемых фосфатов и их накопление при внесении фосфорных удобрений / А.В. Соколов // Почвоведение. – 1958. – № 2. – С. 11–15.
141. Соколов, А.В. Определение усвояемости фосфатов почвы и удобрений при помощи радиоактивного изотопа фосфора. – Москва: [б. и.], 1955. – 12 с.
142. Стекольников, К.Е. Влияние систем применения удобрения на режим фосфатов чернозема выщелоченного / К.Е. Стекольников, С.С. Ярцева, А.В. Ковова // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2015. – Т. 15, № 4–2(47). – С. 34–41.
143. Стекольников, К.Е. Карбонатно-кальциевый режим и гумусовое со-

стояние черноземов лесостепи ЦЧЗ: дис. д-ра ... с.-х. наук: 03.02.13 / К.Е. Стекольников. – Воронеж, 2011. – 409 с.

144. Стекольников, К.Е. Фосфатазная активность чернозема выщелоченного и режим фосфатов в стационарном опыте / К.Е. Стекольников, А.В. Комова // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. – 2017. – № 3(65). – С. 183–188.

145. Стокозов, И.П. Динамика содержания подвижных форм фосфора и калия в почвах ЦЧР при различной интенсивности применения удобрений. Черноземы России: экологическое состояние и современные почвенные процессы / И.П. Стокозов, С.А. Шафран // Материалы научной конференции, посвященные 75-летию кафедры почвоведения и агрохимии Воронежского государственного университета (Воронеж, 25–28 сентября 2006 г.). – Воронеж: Изд-во Воронежского гос. ун-та, 2006. – С. 182.

146. Структурно-функциональная роль почв и почвенной биоты в биосфере ; под. ред. Г.В. Добровольского. – Москва: Наука, 2003. – 364 с.

147. Стулин, А.Ф. Эффективность дефеката в звене севооборота на выщелоченном черноземе Воронежской области / А.Ф. Стулин, Н.А. Гоцка, А.В. Косолапова // Агрохимия. – 1990. – № 4. – С. 84–88.

148. Султанов, Р.А. Органические формы фосфатов в почве / Р.А. Султанов. – Москва: ВНИИ ТЭИСХ, 1976. – 49 с.

149. Сычев, В.Г. Приемы оптимизации фосфатного режима почв в агротехнологиях / В.Г. Сычев, К.А. Кирпичников. – Москва: ВНИИА, 2009. – 176 с.

150. Таразанова, Т.В. Диагностика степени выпаханности почв зонального ряда Европейской части России: автореф. дис. ... канд. биол. наук: 03.00.27 / Т.В. Таразанова. – Москва, 2002. – 22 с.

151. Теория и практика химического анализа почв; под ред. Л.А. Воробьевой. – Москва: ГЕОС, 2006. – 400 с.

152. Трофимов, А.В. Реакция почвы (рН) как функция влажности и концентрации почвенного раствора / А.В. Трофимов // Почвоведение. – 1931. – № 21. – С. 5–45.

153. Тюлин, А.Ф. О коллоидно-химическом поглощении фосфорной кислоты почвами и глинистыми минералами / А.Ф. Тюлин, Т.А. Маломахова // Почвоведение. – 1952. – № 6. – С. 514–527.
154. Ферсман, А.Е. Занимательная геохимия / А.Е. Ферсман. – Москва: Академия наук СССР, 1959. – 399 с.
155. Физико-географическое районирование черноземных областей; под ред. Ф.Р. Милькова. – Воронеж: Изд-во ВГУ, 1963. – 263 с.
156. Фокин, А.Д. О роли органического вещества почв в функционировании природных и сельскохозяйственных экосистем / А.Д. Фокин // Почвоведение. – 1994. – № 4. – С. 22–26.
157. Хазиев, Ф.К. Влияние сельскохозяйственного использования на некоторые свойства чернозема типичного карбонатного / Ф.К. Фазиев, Р.Я. Рамазанов, Ф.Я. Багаутдинов, Ф.М. Богданов // Почвоведение. – 1988. – № 3. – С. 33–38.
158. Хейфец, Д.М. Методика определения и содержание минеральных и органических соединений фосфора в некоторых почвах Советского Союза / Д.М. Хейфец // Почвоведение. – 1948. – № 2. – С. 100–112.
159. Хмелинин, И.Н. Фосфор в подзолистых почвах и процессы трансформации его соединений / И.Н. Хмелин. – Ленинград: Наука, 1984. – 150 с.
160. Ходсон, П. Значение фосфора для бактерий и вирусов / П. Ходсон // В кн. Фосфор в окружающей среде; под ред. Э. Гриффита и др.; пер. с англ. – Москва: Мир, 1977. – С. 490–515.
161. Хохлова, Т.И. Формы фосфора в некоторых почвах Кузнецкой лесостепи / Т.И. Хохлова // Агрохимия. – 1966. – № 9. – С. 40–45.
162. Хруцкий, С.В. Альбом геологических разрезов Центрально-Черноземных областей / С.В. Хруцкий, В.М. Смольянинов, Э.В. Косцова. – Воронеж: Изд-во ВГУ, 1974. – 126 с.
163. Цыганов, М.С. Почвы и условия почвообразования территории опытного поля полевой опытной станции ВСХИ / М.С. Цыганов, В.Ф. Куклинова. – Воронеж: ВСХИ, 1954. – 134 с.
164. Цыганок В.Д. Изменение фосфатного потенциала карбонатных черно-

земов Молдавии при поглощении ортофосфатов: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук: 03.02.13 / В.Д. Цыганок. – Кишинев, 1970. – 23 с.

165. Цыплаков, С.Е. Формы соединений тяжелых металлов в черноземе выщелоченном в условиях длительного применения удобрений и мелиоранта: дис. ... канд. биол. наук: 03.02.13 / С.Е. Цыплаков. – Воронеж, 2013. – 141 с.

166. Чириков, Ф.В. Агрохимия калия и фосфора / Ф.В. Чириков. – Москва: Колос, 1956. – 464 с.

167. Чириков, Ф.В. Превращение фосфорной кислоты фосфорных удобрений в основных типах почв / Ф.В. Чириков // Почвоведение. – 1939. – № 4. – С. 45.

168. Чумаченко, И.Н. Проблема фосфора в земледелии и эффективность фосфорных удобрений / И.Н. Чумаченко. – Москва: ТСХА, 1980. – 215 с.

169. Шарпф, Л.Г. Превращения природных фосфорорганических соединений в окружающей среде / Л.Г. Шарпф // В кн. Фосфор в окружающей среде; под ред. Э. Гриффита и др.; пер. с англ. – Москва: Мир, 1977. – С. 428–449.

170. Шафран, С.А. Оптимизация содержания подвижных форм P_2O_5 и K_2O в различных почвах / С.А. Шафран // Химия в сельском хозяйстве. – 1984. – № 2. – С. 6–8.

171. Шильников, И.А. Известкование как фактор формирования урожайности полевых севооборотов и экологической устойчивости агроценозов / И.А. Шильников, Н.И. Аканова, Е.В. Курносова и др. // Нива Поволжья. – 2012. – № 3. – С. 23–32.

172. Щербаков, А.П. Плодородие почв, круговорот и баланс питательных веществ / А.П. Щербаков, И.Д. Рудай. – Москва: Колос, 1983. – 189 с.

173. Энгельгардт, А.Н. Из деревни. 12 писем / А.Н. Энгельгардт. – Москва, 1937. – 67 с.

174. Adepetu, J.A. Changes in N and P availability and P fractions in two soils from Nigeria under intensive cultivation / J.A. Adepetu, R.B. Corey // Plant and Soil. – 1977. – Vol. 46. – Pp. 309–316.

175. Bhat, K.K. Behaviour in the soil of orthophosphate from pig slurry compared with that of KH_2PO_4 / K.K. Bhat, J.R. O'Callaghan // Journal of Agricultural Sciences. – 1980. – Vol. 94(1). – Pp. 195–201.

176. Bray R.H., Kurtz L.T. Determination of total, organic, and available forms of phosphorus in soils / R.H. Bray, L.T. Kurtz // *Soil Science*. – 1945. – Vol. 59. – Pp. 39–46.
177. Brookes, P.C. Measurement of microbial biomass phosphorus in soil / P.C. Brookes, D.S. Powlson, D.S. Jenkinson // *Soil Biology and Biochemistry*. – 1982. – Vol. 14. – Pp. 319–329.
178. Campbell, L.B.. Organic and inorganic P content, movement and mineralization of P in soil beneath a feed lot / L.B. Campbell, G.J. Racz // *Canadian Journal of Soil Sciences*. – 1975. – Vol. 55. – Pp. 457–466.
179. Castro, C.L. Organic phosphate transport and hydrolysis in soil: Theoretical and experimental evaluation / C.L. Castro, D.E. Rolston // *Soil Science Society of American Journal*. – 1977. – Vol. 41. – Pp. 1085–1092.
180. Chang, S.C. Fractionation of Soil Phosphorus / S.C. Chang, M.L. Jackson // *Soil Science*. – 1957. – Vol. 84(2). – Pp. 957–963.
181. Correll, D.L. The role of phosphorus in the eutrophication of receiving waters: A review/ D.L. Correll // *Journal of Environmental Quality*. – 1998. – Vol. 2. – Pp. 261–266.
182. Dalai, R.C. Soil organic phosphorus / R.C. Dalai // *Advances in Agronomy*. – 1977. – Vol. 29. – Pp. 83–117.
183. Davis, L.R. Sorption of phosphates by non-calcareous Hawaiian soils / L.R. Davis // *Soil Science*. – 1935. – Vol. 40(2). – Pp. 129–158.
184. De Haas, D.W. The use of simultaneous chemical precipitation in modified activated sludge systems exhibited biological excess phosphate removal / D.W. De Haas, H.C. Wentzel, G.A. Ekama // *Water SA*. – 2001. – Vol. 2. – Pp. 135–150.
185. Emmerling A. Über die verchiedenen Formes der Phosphorsaure im Boden und deren Bestimmung / A. Emmerling // *Die Landwm Versuchs-Station*. – 1999. – Vol. 52. – P. 60.
186. Fisher, E. The variability in total and extractable soil phosphorus under a grazed pasture / E. Fisher, B. Thornton, G. Hudson, A.C. Edwards // *Plant Soil*. – 1998. – Vol. 203. – Pp. 249–255.

187. Goring, C.A.I. Biological transformations of phosphorus in soil. I. Theory and methods / C.A.I. Goring // *Plant Soil*. – 1955. – Vol. 6. – Pp. 17–25.

188. Hibbard, P.L. Factors influencing phosphate fixation in soils / P.L. Hibbard // *Soil Science*. – 1935. – Vol. 39(5). – Pp. 337–358.

189. Robertson, W.D. Treatment of wastewater phosphate by reductive dissolution of iron: use of ferric oxyhydroxide media / W.D. Robertson, P.S. Lombardo // *Journal of Environmental Quality*. – 2011. – Vol. 40(6). – Pp. 1955–1962.

190. Russel, E.-Presskott. The reaction between dilute acids and the phosphorous compounds of the soil / E. Russel, J. Prescott // *Journal of Agricultural Science*. – 1916. – Vol. 8(1). – Pp. 65–110.

191. Янишевский, П.Ф. Химическая оценка фосфатного состояния почв / П.Ф. Янишевский // *Агрохимия*. – 1996. – № 4. – С. 95–116.