

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное научное учреждение  
«ФЕДЕРАЛЬНЫЙ РОСТОВСКИЙ АГРАРНЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР»

*На правах рукописи*



**Гаевая Эмма Анатольевна**

**СОХРАНЕНИЕ И ВОСПРОИЗВОДСТВО ПЛОДОРОДИЯ  
ЭРОДИРОВАННЫХ ЧЕРНОЗЕМОВ СЕВЕРНОГО ПРИАЗОВЬЯ**

1.5.19. Почвоведение (биологические науки)

**АВТОРЕФЕРАТ**

на соискание учёной степени  
**доктора** биологических наук

п. Рассвет – 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном научном учреждении  
«Федеральный Ростовский Аграрный Научный Центр»

Научный консультант: **Безуглова Ольга Степановна**,  
доктор биологических наук, профессор, ФГАОУ ВО  
«Южный федеральный университет», Академия биологии и  
биотехнологии им. Д.И. Ивановского, кафедра почвоведения  
и оценки земельных ресурсов, профессор; ФГБНУ  
«Федеральный Ростовский аграрный научный центр»,  
главный научный сотрудник.

Официальные  
оппоненты: **Макаров Олег Анатольевич**,  
доктор биологических наук, профессор, ФГОУ ВО  
«Московский государственный университет имени  
М.В. Ломоносова», кафедра эрозии и охраны почв,  
заведующий;

**Дубовик Елена Валентиновна**,  
доктор биологических наук, ФГБНУ «Курский Федеральный  
Аграрный Научный Центр», Аналитический центр  
коллективного пользования, ведущий научный сотрудник,  
заведующая;

**Минакова Ольга Александровна**,  
доктор сельскохозяйственных наук, ФГБНУ  
«Всероссийский научно-исследовательский институт  
сахарной свеклы и сахара имени А.Л. Мазлумова»,  
лаборатория сортовых технологий возделывания сахарной  
свеклы и агроэкологических исследований в свекловичных  
агроценозах, ведущий научный сотрудник.

Защита диссертации состоится «4» декабря 2025 года в 12:30 на заседании диссертационного совета ЮФУ 801.01.13 по биологическим наукам на базе Академии биологии и биотехнологии им. Д. И. Ивановского Южного федерального университета по адресу: 344090, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 194/1, к. 712.

С диссертацией можно ознакомиться в Зональной научной библиотеке им. Ю.А. Жданова Южного федерального университета по адресу: 344090, г. Ростов-на-Дону, ул. Р. Зорге, 21ж, и на сайте Южного федерального университета <https://hub.sfedu.ru/diss/show/1346216/>

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 г.

Отзыв на автореферат в двух экз. (с указанием даты, полностью ФИО, ученой степени со специальностью, звания, организации, подразделения, должности, адреса, телефона, e-mail), заверенный печатью организации, просим направлять по адресу: 344090, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 194/1, к. 707, ученому секретарю диссертационного совета ЮФУ 801.01.13 Бурачевской М.В., а также в формате .pdf на e-mail: [mburachevskaya@sfedu.ru](mailto:mburachevskaya@sfedu.ru).

Ученый секретарь  
диссертационного совета, к.б.н.



Бурачевская Марина Викторовна

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы.** Проблема почвенного плодородия возникла вместе со сложными процессами освоения земель. Особенно возросла нагрузка на почву в последние десятилетия, обусловленная нарушением основного закона земледелия – возврата почве питательных веществ и энергии, выносимых с урожаем сельскохозяйственных культур (Масютенко и др., 2022). Усугубляется проблема и разрастающимися с каждым годом процессами эрозии. За последние сто лет потеря гумуса в почве составила от 17 до 64 % от исходного, в среднем 25–30 %; за 10 тыс. лет (период землепользования) – около 16 % (Розанов, 1983). На Северном Кавказе с 1883 по 2022 гг. в два раза сократился контур чернозёмов с содержанием гумуса 7–10 %, существенно уменьшился и контур с содержанием 4–7 %, а наибольшие потери гумуса наблюдались в первые годы после распашки целины (Лозановская и др., 1987). Потери гумуса в начале прошлого века при низких урожаях культур составили 0,01 абс. % в год, с внедрением машинных технологий в 30–60 гг. – увеличилась до 0,03, в 80-90-е годы ещё больше – до 0,04–0,05 % (Ачканов и др., 2002).

В Ростовской области более 48,9 % пашни ежегодно подвергается водной эрозии. Площадь смытых почв составляет около 295,7 тыс. га. Ежегодные потери питательных веществ на пашне Ростовской области, вследствие смыва, составляют: азота 54 тыс. т, фосфора – 70 тыс. т и калия – 524 тыс. т, что превышает их количество, внесённое с удобрениями (Доклад о состоянии и использовании ..., 2022). Учитывая размеры эродированной пашни на Юге России и в Ростовской области, ставится задача – разработать и изучить севообороты с высокими почвозащитными свойствами и продуктивностью, близкой к продуктивности полевых севооборотов на плакоре. Решить это можно только сочетанием севооборотов необходимой конструкции с наиболее благоприятными для этого системами удобрения и обработки почвы.

Актуальность, отсутствие или недостаточность материала для положительного решения вышеизложенных проблем определили основную цель работы.

**Степень разработанности темы.** Изучением проблемы деградации черноземов и восстановления их плодородия занимались многие ученые: З.С. Артемьева, (2021); А.Т. Барабанов (2015); Г.П. Глазунов, (2022); Е.В. Дубовик, (2020); М.Н. Заславский, (1987); А.Н. Каштанов С.А., (2000); А.П. Карабутов, (2019); В.И. Кирюшин, (2024); В.А. Крылов, (2022); И.Н. Листопадов, (2009); М.И. Лопырев, (1989, 2012); С.М. Лукин, (2021); О.А. Макаров, (2024); Н.П. Масютенко, (2021, 2023); Д.С. Орлов, (1981); Е.В. Полуэктов, (2005, 2017); В.В. Попов, (2018); И.В. Подлесных, (2020; 2021, 2023); П.М. Сапожников, (2023); В.И. Свиридов, (2021); Г.П. Сурмач, (1976); Ю.П. Сухановский, (2023); С.А. Тарасов, (2020; 2021); О.Г. Чуян, (2015; 2022, 2023); и др. Однако сложность решения проблемы и различная степень выраженности процессов эрозии в разных регионах Ростовской области в зависимости от агротехнических приемов определяют актуальность настоящих исследований.

**Цель исследования:** на основе системного подхода к мониторингу многолетних данных и разработки комплекса приемов стабилизации и повышения плодородия черноземов обыкновенных теоретически обосновать количественные и качественные

изменения, обеспечивающие восстановление плодородия эродированной пашни и экологическую устойчивость почвы, направленные на увеличение продуктивности севооборотов.

**В задачи исследования входило:**

- 1) провести оценку потерь почвенного плодородия за семь ротаций севооборотов (длительный период времени), выявить роль почвозащитных севооборотов и показатели поверхностного стока талой и ливневой воды и смыва почвы;
- 2) сделать предварительный прогноз развития эрозионных процессов и потерь основных элементов питания в севооборотах различных конструкций;
- 3) установить длительное влияние основной обработки почвы и предшественника на водный режим, агрофизические и агрохимические показатели плодородия чернозема обыкновенного, и урожайность культур полевых севооборотов;
- 4) выявить действие приемов основной обработки почвы на развитие корневой системы;
- 5) проанализировать изменение гумусового и азотного, фосфорного и калийного режимов чернозема обыкновенного и сделать предварительный прогноз для выявления наиболее рациональных уровней применения удобрений на эрозионно-опасных склонах, способствующих сохранению и восстановлению почвенного плодородия;
- 6) установить закономерности формирования урожая сельскохозяйственных культур, продуктивности севооборотов в зависимости от предшественников, агротехнологии и системы удобрений;
- 7) провести эколого-экономическую и биоэнергетическую оценку эффективности возделывания сельскохозяйственных культур в зависимости от агротехнических мероприятий в севооборотах различной конструкции.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Применение на эрозионно-опасных склонах Северного Приазовья элементов почвозащитной системы земледелия и почвозащитных севооборотов в сочетании с использованием удобрений обеспечивает сокращение стока и смыва почвы, стабилизацию водно-физических свойств, снижение потерь элементов питания и повышение урожайности сельскохозяйственных культур. Закономерности фракционного распределения структурных отдельностей, установленные с применением анализа главных компонент, позволили теоретически обосновать процессы структурообразования в черноземах обыкновенных, показать их роль в предотвращении водной эрозии.

2. Ретроспективный мониторинг (36 лет) эродированных почв с применением различных агротехнических подходов, включающих экстенсивную систему земледелия, а также органоминеральную и минеральную системы удобрений, позволяет выявить закономерности изменения параметров почвенного плодородия. На эродированных землях экстенсивная система земледелия ведет к снижению содержания гумуса и основных элементов питания. Введение в структуру севооборота на эрозионно-опасных склонах 20 % многолетних трав и внесение  $N_{84}P_{48}K_{48}+8$  т навоза обеспечивает бездефицитное воспроизводство плодородия почвы, а увеличение доли многолетних трав

до 40 % при этой же дозе удобрений приводит к расширенному воспроизводству плодородия.

3. Применение автоматизированных нейросетевых моделей позволяет прогнозировать динамику процессов эрозии, содержания гумуса, подвижного фосфора и обменного калия на склонах крутизной 3,5–4° при различных системах удобрения и длительности их применения. Использование этого подхода эффективно в севооборотах различных конструкций и агротехнологиях возделывания сельскохозяйственных культур.

4. Разработана модель параметров почвенного плодородия чернозема обыкновенного среднеэродированного с применением метода главных компонент, учитывающая вклад интегральных факторов в почвенное плодородие, что обеспечивает более точное прогнозирование планируемой урожайности озимой пшеницы.

**Рабочая гипотеза** состояла в том, что рациональной структурой посевов и чередованием культур в севооборотах в сочетании с различными системами обработки почвы и агротехническими противоэрозионными приемами, а также с различными системами удобрений, можно экспериментально определить оптимальный вариант технологии восстановления плодородия эродированной пашни.

**Научная новизна.** Впервые на обыкновенных черноземах на эрозионно-опасном склоне крутизной 3,5-4° изучена эффективность почвозащитного комплекса в длительном полевом опыте. Проведен анализ процессов эрозии в севооборотах различной конструкции, расположенных на склоне, за длительный период, определены потери основных элементов питания в результате процессов деградации. Впервые рассмотрена на черноземах обыкновенных Ростовской области экологическая роль севооборотов различной эрозионной устойчивости, систем обработки почвы и удобрений в регулировании водного и пищевого режимов, определены основные показатели изменения плодородия почвы и продуктивности культур при систематическом внесении минеральных и органических удобрений, расширены и углублены знания о водном и пищевом режиме почвы, рассчитан баланс гумуса, элементов питания в севообороте при различных системах удобрения и их эколого-экономическая эффективность. Впервые экспериментально установлены сочетания агрономических и экологических факторов, позволяющих наиболее эффективно применять контурно-полостную систему, а также на основе разработанных технологических элементов – севооборотных, почвозащитных, агрохимических – создать целостную в организационном, агрономическом и экологическом плане ландшафтную систему земледелия.

На основании анализа главных компонент впервые были выделены интегральные факторы, вносящие наибольший вклад в дисперсию, и разработана модель параметров почвенного плодородия для чернозема обыкновенного, что позволяет с большей точностью прогнозировать урожайность озимой пшеницы. Также впервые теоретически обоснованы процессы структурообразования в черноземах обыкновенных, показана их роль в предотвращении водной эрозии.

Впервые показано, что метод обработки большого массива данных с помощью автоматизированных нейросетевых моделей позволяет делать прогноз динамики

процессов эрозии, содержания гумуса, подвижного фосфора и обменного калия на склоновых землях.

**Теоретическая и практическая значимость.** Определены фактические величины стока талых и ливневых вод за длительный период времени, выявлена зависимость между стоком талых и ливневых вод и смывом почвы, количеством осадков и средней температурой периода снеготаяния, что позволяет оценивать вклад севооборотов различной конструкции и приемов обработки почвы в сокращение процессов эрозии. Проведен ретроспективный анализ структурно-агрегатного состава чернозема обыкновенного. Проведенные комплексные исследования изменения за длительный период времени содержания гумуса, подвижного фосфора и обменного калия, выполненные в рамках единого методологического подхода, с учетом специфики среднеэродированных склонов, являются теоретической основой для создания концепции сохранения и воспроизводства плодородия черноземов обыкновенных.

Практическая значимость работы заключается в разработке приёмов сохранения и воспроизводства плодородия чернозема обыкновенного среднеэродированного на склоне крутизной 3,5-4,0° в севооборотах различной конструкции: для сокращения процессов эрозии использовать контурно-полосную организацию территории с простейшими гидротехническими сооружениями, почвозащитные севообороты с 20-40 % многолетних трав, чизельную обработку почвы и удобрения в дозе 5 т навоза и N<sub>46</sub>P<sub>30</sub>K<sub>30</sub>, при отсутствии навоза увеличить дозу минеральных удобрений до N<sub>84</sub>P<sub>48</sub>K<sub>48</sub> и долю многолетних трав до 40 %, что позволит до минимума сократить экологические осложнения. Систематически проводить мониторинг содержания гумуса и основных элементов питания для составления прогноза. Долгосрочный прогноз процессов эрозии с использованием автоматизированной нейронной сети на склонах крутизной 3,5-4° с учетом конструкции севооборотов и приемов обработки почвы показал эффективность комплекса рекомендуемых приемов в предупреждении процессов эрозии.

**Личный вклад автора.** Результаты получены при непосредственном участии автора в период с 2007 по 2022 гг. Автором разработана структура диссертационной работы, проведен анализ экспериментального материала, выполнена статистическая обработка, расчёт экономической и биоэнергетической эффективности, обобщен экспериментальный материал в виде диссертационной работы.

**Методология и методы исследования.** При проведении исследований применялся системный подход и комплексные методы: сравнительно-аналитический, вариационно-статистический и экономический. Мониторинг, наблюдения и учет, химические и физические анализы, а также статистическая обработка проводились по общепринятым методикам.

**Степень достоверности и апробация результатов** подтверждена многолетними исследованиями, значительным объемом проведенных анализов и наблюдений, обработкой экспериментального материала. Полевые исследования проводили в 1990–2022 гг. в длительном полевом эксперименте по изучению севооборотов, приемов обработки почвы и уровней применения удобрений на эрозионно-опасном склоне юго-восточной экспозиции крутизной до 3,5-4° в системе контурно-ландшафтной организации

территории склона. Севообороты развернуты в пространстве и во времени, размещение рендомизированное в трехкратной повторности. Опыт зарегистрирован в Российской Географической сети длительных опытов с удобрениями (аттестат № 169). Применялись эмпирические и теоретические методы исследования, результаты длительных полевых экспериментов и агрохимических анализов почвы были подвергнуты статистической обработке, с использованием дисперсионного, корреляционного и регрессионного анализов, а также общепринятых критериев вероятности и значимости, с применением современных компьютерных программ Statistica 13.3.

**Апробация работы.** Результаты исследований отражены в годовых отчетах FNFZ-2022-0003 по научно-исследовательской работе отдела земледелия ФГБНУ ФРАНЦ в 2007-2022 гг., ежегодных отчетах в Геосети о результатах длительного опыта № 169 в 2019-2022 гг. Материалы исследований были представлены в виде докладов и опубликованы в материалах международных конференций. Основные из них: «Технологические аспекты возделывания сельскохозяйственных культур» (Горки, 2018); «Адаптивно ландшафтное земледелие: вызовы XXI века» (Курск, 2018); «Почвы в биосфере» (Томск, 2018); «Современное состояние чернозёмов» (Ростов-на-Дону, 2019; 2023); «Международные Бочкаревские чтения» (Рязань, 2019); «Проблемы современной аграрной науки» и «Проблемы плодородия почв в современной земледелии» (Красноярск, 2020, 2024); «Фундаментальные концепции физики почв: развитие, современные приложения и перспективы» (Москва, 2024); а также в Трудах VIII и IX съезда Общества почвоведов им. В.В. Докучаева «Почвы – стратегический ресурс России» Сыктывкар, 2021) и «Почвы – опора России» (Казань, 2024), «International online conference on environmental transformation and sustainable development in Asian region, Entransasia 2020» (Irkutsk, 2020); International scientific Conference (Курск, 2021); «International Conference on World Technological Trends in Agribusiness» (Omsk, 2020).

**Соответствие темы паспорту специальности.** Диссертационная работа соответствует паспорту специальности 1.5.19. Почвоведение по п. 5. Теоретические, научно-методические и практические вопросы физики и механики почв. Изучение водно-физических свойств, водного и температурного режимов почв в естественных и агроценозах; по п. 6. Теоретические и научно-методические вопросы химии почв. Изучение взаимодействия органических и минеральных компонентов почв. Техногенное и агрогенное химическое загрязнение почв, изменение их естественной кислотности, химического состава и физико-химических свойств; по п. 8. Оценка плодородия почв и мониторинг его состояния. Агрохимические и экологические основы управления почвенным плодородием и оптимизация его параметров; по п. 12. Охрана почв и почвенного покрова от деградации. Разработка методов моделирования, прогнозирования и предупреждения эрозионных процессов.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 171 работ, общим объемом 93,2 п.л. (личный вклад автора 60,2 п.л.), 8 из них – статьи в журналах, входящих в базы данных международных индексов научного цитирования Scopus и Web of Science, 2 в статьях, входящих в базу данных Russian Science Citation Index (RSCI), 28 – в

рецензируемых журналах, рекомендуемых ВАК РФ; 8 монографий и глав монографий, 12 методических рекомендаций производству, а также 2 патента (в соавторстве).

**Структура и объем работы.** Диссертация изложена на 419 страницах машинописного текста, содержит 87 таблиц, 70 рисунков, библиографический список включает 390 источников, из них на иностранном языке 102, 3 приложения. Состоит из введения, трех частей, включающих 5 глав, выводов и рекомендаций производству.

**Финансовая поддержка исследований.** Работа выполнена в рамках государственного задания FNFZ-2022-0003 «Разработать усовершенствованные эколого-адаптивные технологии возделывания новых сортов сельскохозяйственных культур в севооборотах различных конструкций Приазовской зоны Ростовской области», а также при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (№ FENW-2023-0008), Мегагранта РНФ (№ 25-76-31013) и Программы стратегического академического лидерства Южного федерального университета ("Приоритет 2030").

**Благодарности.** Автор выражает искреннюю благодарность и глубокую признательность доктору биол. наук О.С. Безугловой за ценные замечания и предложения, оказание консультативной помощи в написании диссертационной работы, а также зав. отделом земледелия и растениеводства ФГБНУ ФРАНЦ, канд. с.-х. наук Н.Н. Вошедскому, сотрудникам отдела канд. с.-х. наук В.А. Кулыгину, д-ру. с.-х. наук И.Н. Ильинской, С.А. Тарадину, А.В. Мищенко за оказанную помощь и поддержку в решении поставленных задач.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**1. Первая глава диссертации** посвящена обзору литературы о масштабах распространения эрозии и способах ее устранения. Рассмотрены также роль севооборотов и приемов обработки почвы в процессах развития деградации и воспроизводстве плодородия. Приводятся данные о влиянии процессов деградации почвы на агрофизические свойства. Рассматривается роль корневых систем в предотвращении процессов эрозии. Анализируются масштабы изменения плодородия почвы в результате процессов её деградации. Представлен анализ урожайности сельскохозяйственных культур в условиях эрозионно-опасного склона.

### **2. Условия, объекты, схема проведения опытов и методика исследований**

**Характеристика почвенно-климатических условий и места проведения исследований.** Полевые исследования проводили в 1990-2022 гг. в длительном полевом эксперименте по изучению севооборотов, приемов обработки почвы и уровней применения удобрений на эрозионно-опасном склоне юго-восточной экспозиции крутизной до 3,5-4° балки Большой Лог Аксайского района Ростовской области. Опытный участок вписывается в контурно-ландшафтную систему организации территории склона, размещение культур – полосное, направление обработки почвы и посева – поперек склона приближенно к горизонталям. Опыт зарегистрирован в Российской Географической сети длительных опытов с удобрениями (аттестат № 169).

Почвенный покров участка представлен черноземом обыкновенным карбонатным среднеэродированным среднемощным малогумусным тяжелосуглинистым на лессовидном суглинке (Классификация почв СССР, 1977). Согласно международной

классификации WRB почва диагностируется как Calcic Chernozem (Loamic, Pachic) (World Reference Base..., 2014). Мощность  $A_{\text{пах}}$  – 25-30 см,  $A+B$  – от 40 до 60 см – в зависимости от смывости. Среднегодовой сток 20 мм (максимальный 34,4 мм). Среднегодовой смыв почвы 18,5 т/га (максимальный – 42 т/га). Смывость почвенного покрова при закладке опыта – среднеэродированная. Слой весеннего стока 10 % обеспеченности – 52 мм, среднегодовой сток около 20 мм. Содержание общего азота в слое 0–30 см – 0,14–0,16 %, исходное содержание подвижных фосфатов низкое – 15,7–18,2 мг, обменного калия – 282–337 мг на 1 кг почвы.

**Методика проведения исследований и наблюдений.** Исследования проводили в трех севооборотах различной конструкции.

#### Схема опыта

В опыт включены три фактора:

**Фактор А.** Были использованы три севооборота с различным соотношением эрозионно-устойчивых и неустойчивых культур. В качестве многолетних трав высевали: с 1990 г. по 2008 г. люцерну; с 2009 г. по 2014 г. четырехкомпонентную смесь (люцерна + эспарцет + житняк + кострец); с 2015 г. на опыте высевается эспарцет. Пропашные культуры высевали: с 1990 г. по 2010 г. кукурузу на силос; с 2011 г. в севооборотах «А» и «Б» кукуруза на силос была заменена на подсолнечник, в севообороте «В» – кукурузу на зерно.

#### **Севообороты**

Севооборот «А»	Севооборот «Б»	Севооборот «В»
1. Пар чистый	1. Горох	1. Пропашные
2. Озимая пшеница	2. Озимая пшеница	2. Озимая пшеница
3. Озимая пшеница	3. Пропашные	3. Яровой ячмень
4. Пропашные	4. Яровой ячмень	4. Многолетние травы
5. Яровой ячмень	5. Многолетние травы	5. Многолетние травы

Опыт развернут всеми полями. Опытные поля севооборотов и уровней применения удобрений располагались рендомизированно, Приемы обработки почвы – последовательно. Размер опытных делянок – 300–2000 м<sup>2</sup>.

**Фактор Б. Система обработки почвы.** Исследования на опыте проводили по двум вариантам обработки почвы в севооборотах: почвозащитная (чизельная) и отвальная (контроль). Почвозащитная обработка (чизельная) осуществлялась чизельным плугом ПЧ-2,5, отвальная – плугом ПЛН-5-35.

**Фактор С. Система удобрений.** Изучали два уровня применения удобрений, за контроль был принят вариант естественного плодородия – «0»; «1» – первый уровень применения удобрений (средний) – 5 т навоза +  $N_{46}P_{30}K_{30}$  (106 кг д.в. на 1 га севооборотной площади); «2» – второй уровень применения удобрений (высокий) – 8 т навоза +  $N_{84}P_{48}K_{48}$  (180 кг. д.в. на 1 га севооборотной площади). С 2006 года доза фосфора в минеральном удобрении уменьшена на 18–38 % с целью предупреждения «зафосфачивания» («1» –  $P_{24}$ , «2» –  $P_{30}$ ). С 2013 года из системы внесения удобрений исключен навоз. С 2020 года были восстановлены дозы внесения фосфорных удобрений (таблица 1).

Таблица 1 – Схема внесения удобрений с 1990 г. по 2022 г.

Уровень применения удобрений	Годы внесения удобрений			
	1990-2005 гг.	2006-2012 гг.	2013-2019 гг.	2020-2022 гг.
«0» – нулевой уровень	Естественное плодородие			
«1» – первый (средний)	5 т навоза + N <sub>46</sub> P <sub>30</sub> K <sub>30</sub>	5 т навоза + N <sub>46</sub> P <sub>24</sub> K <sub>30</sub>	N <sub>46</sub> P <sub>24</sub> K <sub>30</sub>	N <sub>46</sub> P <sub>30</sub> K <sub>30</sub>
«2» – второй (высокий)	8 т навоза + N <sub>84</sub> P <sub>48</sub> K <sub>48</sub>	8 т навоза + N <sub>84</sub> P <sub>30</sub> K <sub>48</sub>	N <sub>84</sub> P <sub>30</sub> K <sub>48</sub>	N <sub>84</sub> P <sub>48</sub> K <sub>48</sub>

**Методика проведения исследований и наблюдений.** В почвенных образцах определяли запасы продуктивной влаги (ГОСТ 28268-89), водопроницаемость почвы по Качинскому и агрегатный состав почвы по методу Саввинова, «мокрое просеивание» проводили на приборе Бакшеева (Вадюнина и Корчагина, 1986; Доспехов и др., 1987), определение смыва и размыва почвы измерением объема водороев по методу Дьякова (1984). Определение содержания гумуса и подвижных элементов питания в почве проводили по соответствующим методикам (ГОСТ 26213-84; ГОСТ Р 53219-2008; ГОСТ 26205-91).

**Метеорологические условия проведения исследований.** За период с 1990 года по 2022 год годовое количество осадков составило 551 мм или на 14,0 % больше среднемноголетнего количества. Температурный режим (10,6 °С) был также выше среднемноголетних значений на 23,7 %, в отдельные месяцы эта разница была более чем в два раза.

**Статистическую обработку результатов исследования** проводили с использованием Microsoft Excel и программы Statistica 13.3 (StatSoft, Inc. STATISTICA, 2020). В таблицах представлены средние значения (*M*) и их стандартные отклонения ( $\pm$  SEM). Для уменьшения размерности данных был использован анализ главных компонент (PCA), позволяющих описывать объекты меньшим числом обобщенных показателей – главными компонентами (ГК). Анализ проведен на основе корреляционной матрицы с использованием программного обеспечения (StatSoft, Inc. STATISTICA, 2020). Составление долгосрочных моделей прогноза было осуществлено с помощью нейросетевых моделей с использованием программы STATISTICA (2020) – автоматизированные нейронные сети (АНС). Тип сети при использовании АНС – многослойный персептрон (MLP).

### 3. Влияние агротехнических приемов на эрозионные процессы в системе контурно-полосной организации территории

**Динамика стока талой и ливневой воды на эрозионно-опасных склонах в зависимости от конструкции севооборотов.** Одним из основных факторов потери плодородия на эрозионно-опасных склонах является водная эрозия почв. Наблюдения за стоком талых и ливневых вод проводили с 1992 по 2022 год (30 лет) (рис.1). Процессы эрозии были проявлены в 22-х годах наблюдений (71 %). В севооборотах при контурно-ландшафтной организации склона и полосном размещении культур величина стока талой

воды и смыва почвы определялась в значительной мере соотношением эрозионно-устойчивых и неустойчивых культур.

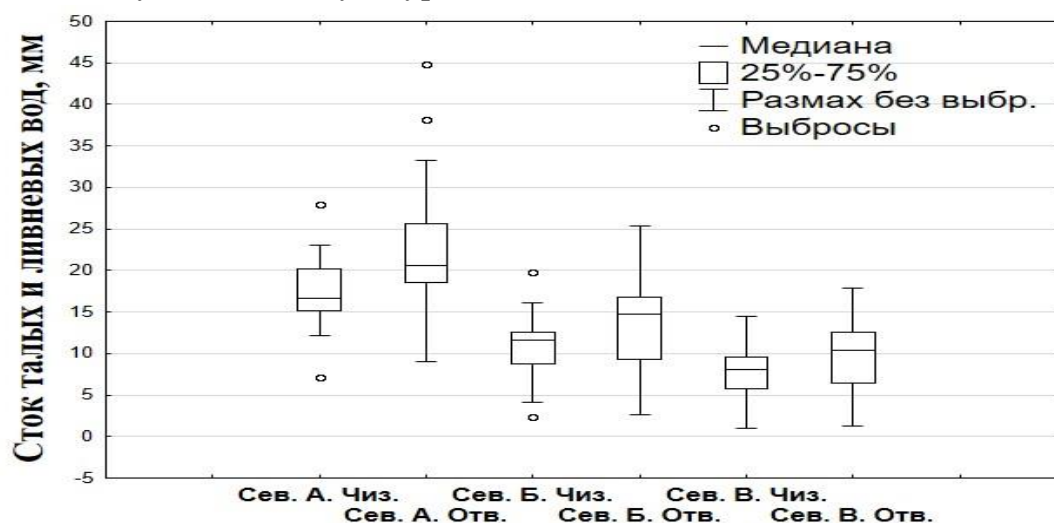


Рисунок 1 – Сток талой и ливневой воды в зависимости от конструкции севооборота и приемов обработки почвы, 1992-1994; 1997-2000; 2003-2008; 2010-2019, 2021 гг.

За период исследований наибольший сток зарегистрирован в контрольном севообороте «А» с 20 % чистого пара и без многолетних трав  $22,7 \pm 1,7$  мм ( $p < 0,05$ ), а самый низкий ( $9,5 \pm 1,0$  мм; ( $p < 0,05$ )) в севообороте «В» – без чистого пара и с 40 % многолетних трав в структуре посевов. В севообороте «В» отмечена наибольшая эрозионная устойчивость – сток был на 56,3 % ( $p < 0,05$ ) меньше, чем в контрольном севообороте без многолетних трав. Севооборот «Б» с 20 % многолетних трав занимал промежуточное положение, в нем сток составлял  $13,3 \pm 1,3$  мм, что на 33,9 % ниже, чем в контрольном севообороте с 20 % чистого пара и на 25,6 % больше, чем в севообороте с 40 % многолетних трав.

При сплошном размещении культур максимальный сток составлял 34,4 мм, а коэффициент стока был наиболее высоким 0,49. Контурно-полосное размещение культур в различных севооборотах позволило сократить этот показатель. Тем не менее, в севообороте «А» с 20 % чистого пара отмечен достаточно высокий коэффициент стока (0,32), по мере увеличения доли многолетних трав от 20 до 40 % этот показатель снижался до 0,18-0,13. Контурно-полосная организация территории склона и чередование в полосах устойчивых и неустойчивых к эрозии культур позволили сократить сток на 34,0-71,2 %.

**Динамика стока талой и ливневой воды на эрозионно-опасных склонах в зависимости от агротехнологии возделывания сельскохозяйственных культур.** Приемы обработки почвы значительно отразились на показателе стока воды и при чизельной обработке он был ниже на 21,0-23,9 % ( $p < 0,05$ ), чем в вариантах отвальной.

Коэффициент стока при использовании чизельной обработки почвы в севооборотах уменьшался с увеличением доли многолетних трав от 0 % в севообороте «А» до 40 % в севообороте «В», что привело к уменьшению коэффициента стока в ряду: 0,25 → 0,15 → 0,11.

**Динамика смыва почвы на эрозионно-опасных склонах в зависимости от конструкции севооборотов.** Последствиями стока талых и ливневых вод является смыв

почвы. В среднем количество смытой почвы на полях, не имеющих почвозащитного комплекса, составило 18,5 т/га, максимальное количество за годы наблюдений превышало 42,0 т/га (рис. 2).

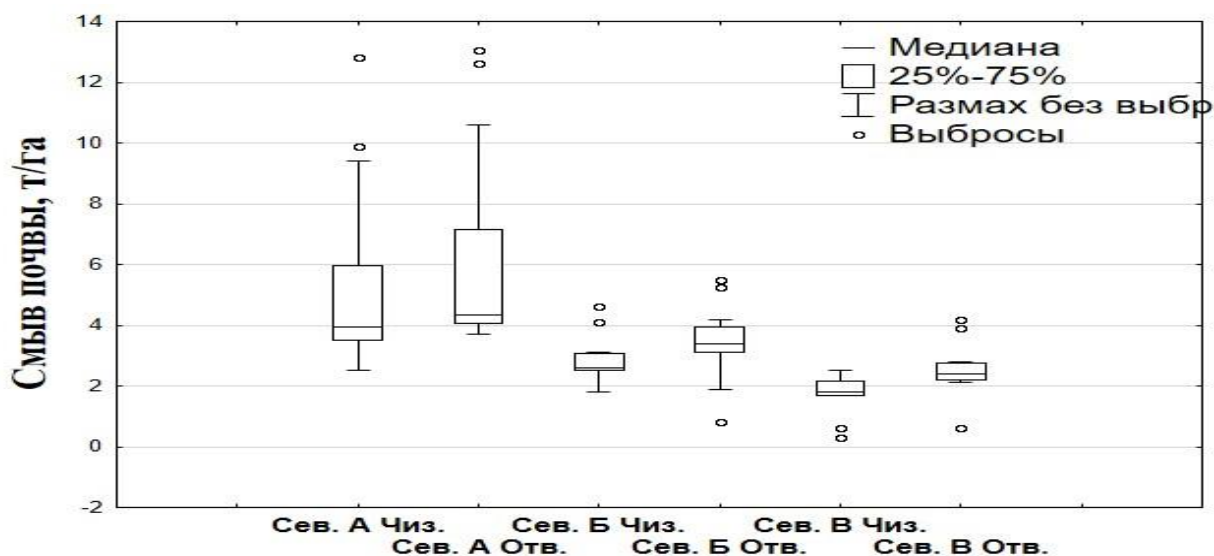


Рисунок 2 – Смыв почвы в зависимости от конструкции севооборота и приема обработки почвы 1992-1994; 1997-2000; 2003-2008; 2010-2019 гг., 2021 г.

Предельно допустимые потери почвы для Ростовской области составляют 3,0-3,5 т/га в год – количество почвы, образующееся в течение года в естественных ценозах в пересчете на углерод. Использование систем земледелия на ландшафтной основе с контурно-полосным размещением культур, простейшими гидротехническими сооружениями и почвозащитными севооборотами в длительном опыте позволило сократить эти потери. Наибольшее количество смытой почвы было отмечено в контрольном севообороте с 20 % чистого пара, и составляло 5,8 т/га. В севообороте с 20 % многолетних трав смыв почвы был меньше на 35,5 %, а в севообороте с 40 % многолетних трав на – 52,5 % ( $p < 0,05$ )

Коэффициент подверженности эрозионным процессам за годы наблюдения: в севообороте «А» составлял 1,7-1,9, в севообороте «Б» – 1,1-1,3 и в севообороте «В» – 0,8-0,9. С увеличением доли многолетних трав до 40 % коэффициент подверженности эрозионным процессам уменьшился в 2 раза.

**Динамика смыва почвы на эрозионно-опасных склонах в зависимости от агротехнологии возделывания сельскохозяйственных культур.** Применение чизельной обработки почвы имело тенденцию уменьшения смыва почвы в севообороте «А» с 5,8 т/га до 5,0 т/га или на 13,0 %; в севообороте «Б» – на 22,2 %; а в севообороте «В» – на 22,7 % по сравнению с отвальной обработкой почвы. Использование контурно-полосной организации территории склона совместно с почвозащитной обработкой сокращает смыв почвы в севооборотах на 72,8–88,5 %, с большими значениями в севообороте с 40 % многолетних трав.

**Зависимость смыва почвы от стока талых и ливневых вод на эрозионно-опасных склонах.** Севообороты различаются соотношением культур эрозионно-устойчивых и неустойчивых в структуре посевов, поэтому имеют различные показатели стока талой и ливневой воды и смыва почвы. Одним из факторов, влияющих на смыв

почвы, является сток талых и ливневых вод. На склоне крутизной 3,5-4° выявлена тесная прямая зависимость ( $R^2=0,78-0,89$ ) при прочих равных условиях между стоком талых и ливневых вод и смывом почвы, при увеличении стока воды на 1 мм увеличивается смыв почвы на 0,11-0,27 т/га. Значительное влияние на эрозионные процессы оказывают метеорологические условия периода формирования стока талых вод и смыва почвы (рис. 3).

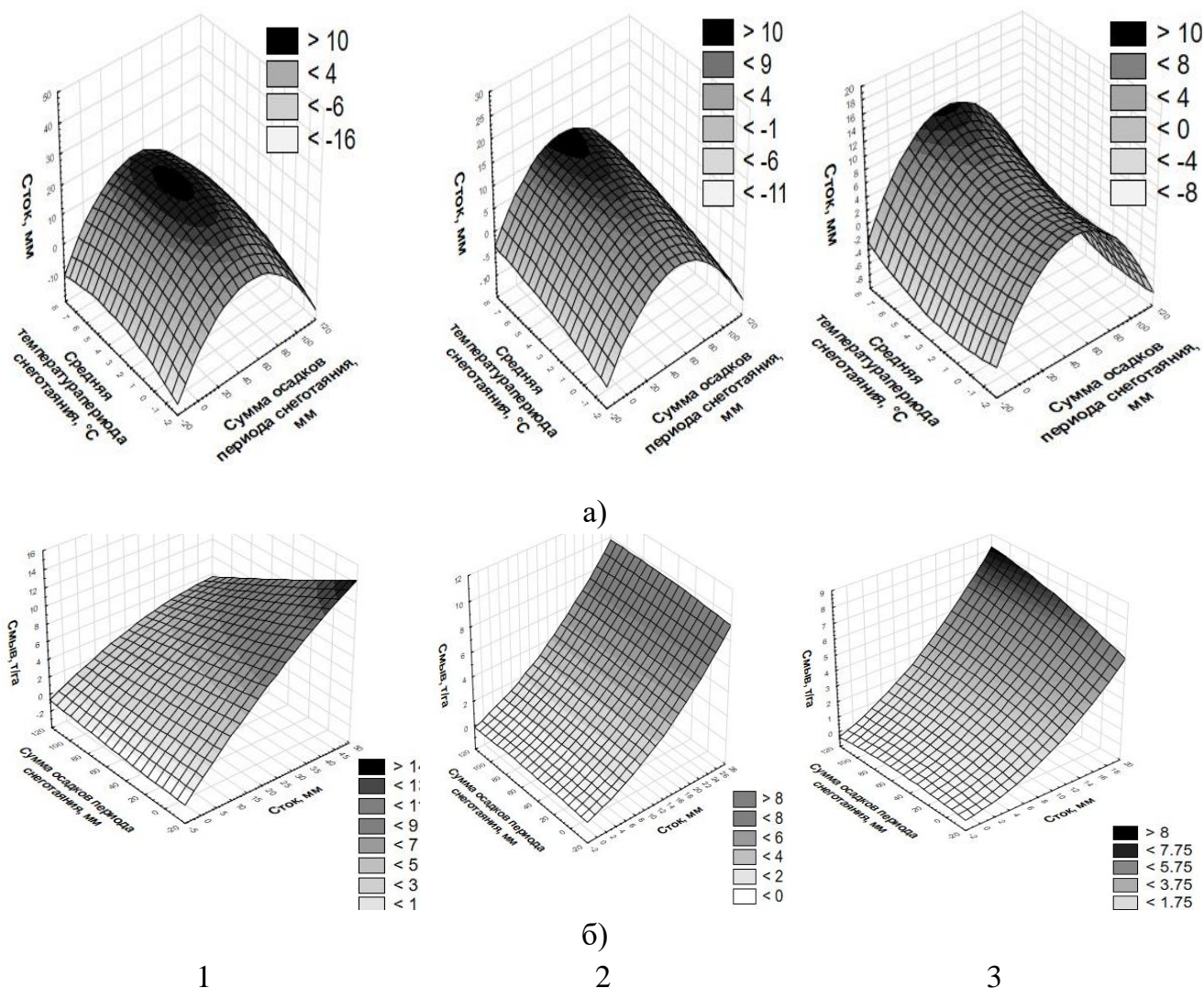


Рисунок 3 – Зависимость: а) стока (мм) и б) смыва почвы (т/га) от средней температуры периода снеготаяния (°C) и суммы осадков периода снеготаяния (мм) в севооборотах различной конструкции (1 – севооборот «А»; 2 – севооборот «Б»; 3 – севооборот «В»), 1990–2022 гг.

Сумма осадков и средняя температура периода снеготаяния значительно влияла на процессы эрозии в частности на сток и смыв ( $r = 0,42-0,79$ ). Севооборот с 20 % чистого пара в большей степени подвержен процессам эрозии и сток (15-20 мм) начинается при более низких температурах (1,5-2 °C). С увеличением доли многолетних трав (до 40 %) севообороты приобретают большую эрозионную устойчивость и интенсивный сток начинается при более высоких значениях среднесуточной температуры 3-4 °C и 5-6 °C и составляет 10-15 мм и 10-12 мм, соответственно.

В зернопаропропашном севообороте смыв почвы 14 т/га отмечался при стоке 50 мм, увеличение доли многолетних трав до 20-40 % снижает максимальный смыв до 8-10 т/га при стоке 20-28 мм и сумме осадков периода снеготаяния 20-60 мм.

#### 4. Прогноз развития процессов деградации на эрозионно-опасных склонах черноземов обыкновенных среднеэродированных

**Прогноз стока талых и ливневых вод.** Составление долгосрочных прогнозов необходимо для планирования предупредительных мероприятий по защите агрочерноземов от эрозии, включающих систему лесомелиоративных и агротехнических почвозащитных мероприятий. Для составления прогноза стока воды и смыва почв были использованы автоматизированные нейронные сети (АНС). Архитектура нейронной сети – многослойный персептрон (MLP), имеющий 32 входных нейрона, от 2 до 6 нейронов на внутреннем слое и 1 нейрон на выходе. Были построены и отобраны три автоматизированные нейронные сети с наилучшими статистическими параметрами.

Составленный прогноз с использованием АНС выявил общую тенденцию затухания процессов эрозии на склонах крутизной 3,5-4°, но интенсивность затухания различна. Использование севооборотов с различной долей многолетних трав от 20 до 40 % в структуре посевных площадей сокращает сток талых и ливневых вод на 22,9-24,9 %, а в отдельных случаях – полностью. В результате проведенного анализа получены предсказанные значения стока (13,7 мм, 8,2 мм и 5,8 мм) (рисунок 4).

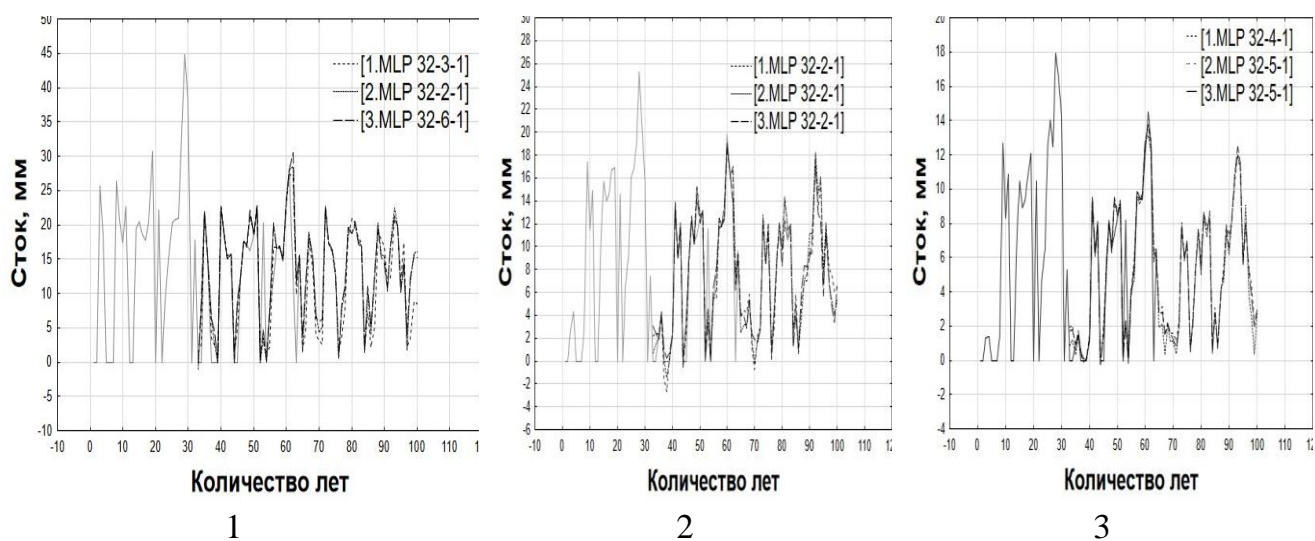


Рисунок 4 – Проекция временного ряда до 2122 года для стока талых и ливневых вод в севооборотах различных конструкций (1 – севооборот «А»; 2 – севооборот «Б»; 3 – севооборот «В»), мм.

Применение почвозащитной обработки сокращает сток талых и ливневых вод с 28,0 мм до 17,8 мм или на 36,4 %.

**Прогноз смыва почвы.** Полученный прогноз с использованием АНС выявил общую тенденцию сокращения смыва почвы в зернопаропропашном севообороте до 10,8 т/га, введение в севообороты от 20 до 40 % многолетних трав позволяет сократить смыв почвы на 34,2-49,0 % (7,1 т/га и 5,5 т/га), а в отдельные годы полностью (рис. 5).

Применение почвозащитной обработки сокращает смыв почвы на 41,5 %. Если тренд в изменении климатических условий в течение длительного периода лет меняться не будет, и технологии возделывания сельскохозяйственных культур останутся неизменными, то можно предположить, что процессы деградации будут менее интенсивными.

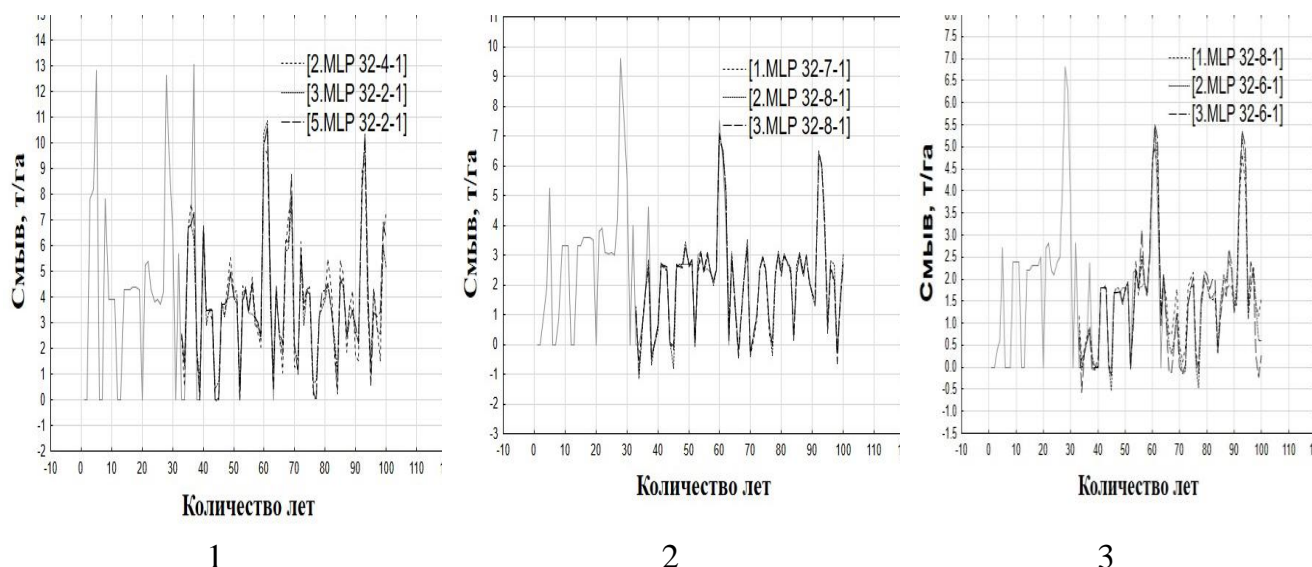


Рисунок 5 – Проекция временного ряда до 2122 года для смыва почвы в севооборотах различных конструкций (1 – севооборот «А»; 2 – севооборот «Б»; 3 – севооборот «В»), т/га.

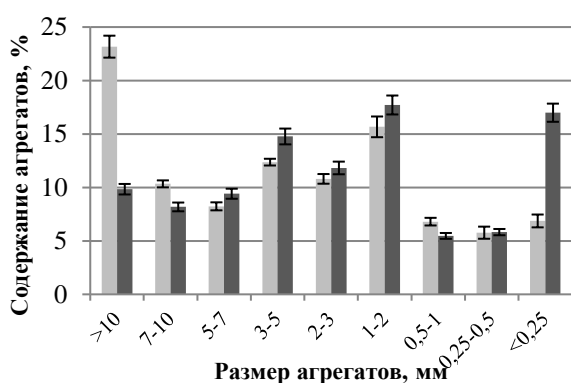
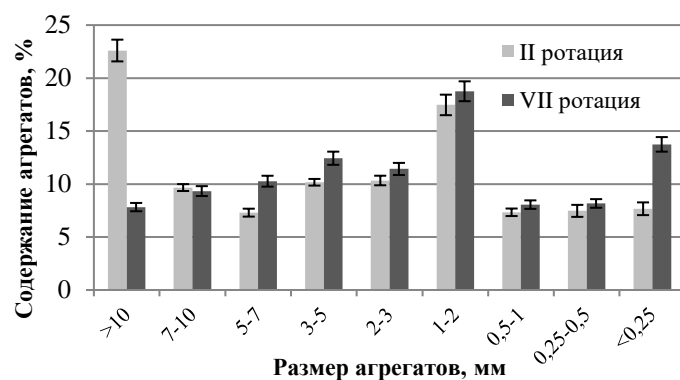
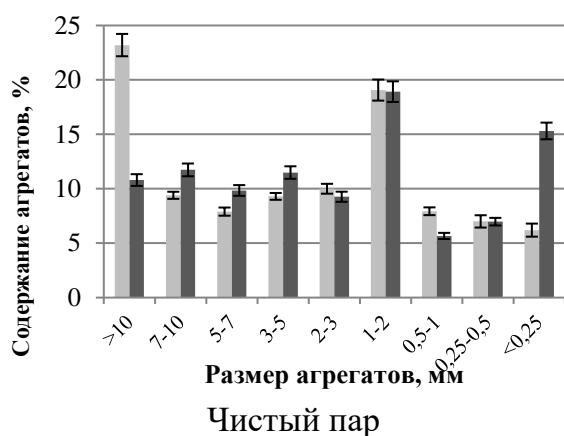
## 5. Факторы, влияющие на развитие эрозионных процессов

### *Динамика агрофизических показателей в зависимости от предшественников.*

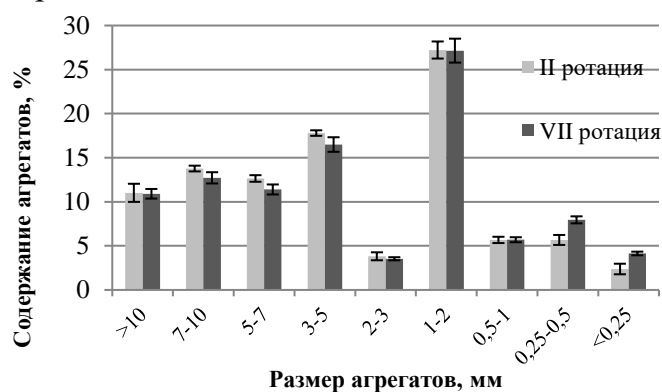
Одним из основных показателей агрофизической оценки агрочерноземов является структурное состояние почвы, изучаемое в течение семи ротаций. Первый отбор проб почвы проводили в конце II-й ротации пятипольных севооборотов в чистом пару, под озимой пшеницей, посеянной по чистому пару, и под озимой пшеницей по предшественнику кукуруза, а также под многолетними травами, второй – в конце VII-й ротации по этим же предшественникам (рис. б).

Количество почвенных агрегатов фракции  $>10$  мм уменьшилось за 7 ротаций севооборота более чем в 2 раза с 20,9-22,7 %, до 7,1-8,9 % ( $p < 0,05$ ). В посевах многолетних трав доля этой фракции незначительно увеличилась с 6,9 до 8,3 % ( $p > 0,05$ ). Одновременно наблюдается за пять ротаций севооборотов значимое увеличение вклада пылеватой фракции ( $<0,25$  мм) с 9,1 до 20,0 % ( $p < 0,05$ ) за исключением посевов многолетних трав.

В агрочерноземах отмечено увеличение  $K_{стр}$  с 2,1 до 3,4 за пять ротаций, а средневзвешенный диаметр агрегатов уменьшился с 4,4–4,7 до 3,2-3,5 мм. В то же время общее количество агрономически ценных агрегатов увеличилось с 68,1–69,4 до 71,6-77,0 %. Под посевами многолетних трав эти показатели не изменились за длительный срок наблюдений.



Озимая пшеница по предшественнику чистый пар



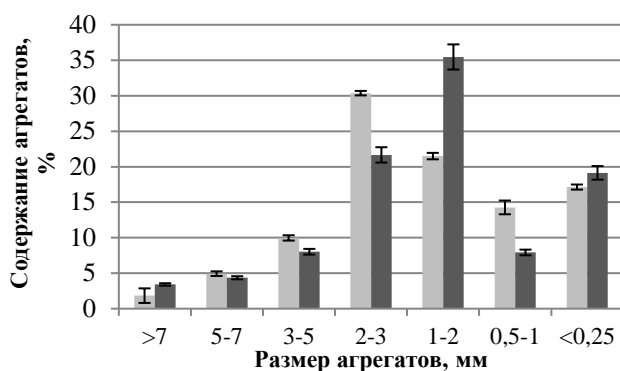
Озимая пшеница по предшественнику кукуруза

Многолетние травы

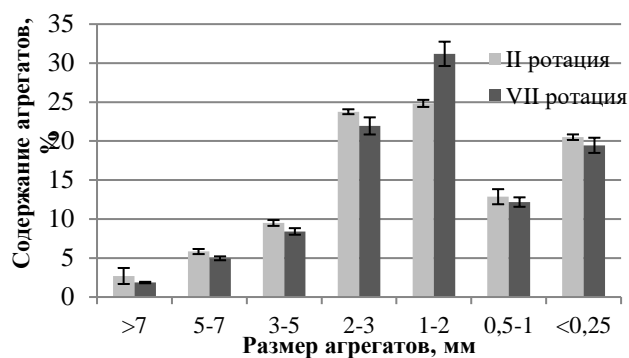
Рисунок 6 – Динамика структурно-агрегатного состава почвы (просеивание на воздухе) в слое почвы 0–30 см в конце второй (II) и в конце седьмой (VII) ротации севооборотов, %, 1990–2022 гг.

**Динамика агрофизических показателей в зависимости от агротехнологии возделывания сельскохозяйственных культур.** Воздействие различных приемов обработки почвы оценивали по ее структурному состоянию. Применение чизельной обработки почвы в чистом пару и под озимую пшеницей приводит к увеличению доли крупно глыбистых фракций (на 10,2-21,7 %) и мезоагрегатов (на 3,0-21,3 %) при одновременном сокращении вклада фракции размером <0,25 мм (на 5,6-37,8 %) по сравнению с данными по отвальной обработке ( $p < 0,05$ ). Количество агрономически ценных агрегатов, величины  $K_{стр.}$  и СВД при применении чизельной обработки почвы выше, чем при отвальной.

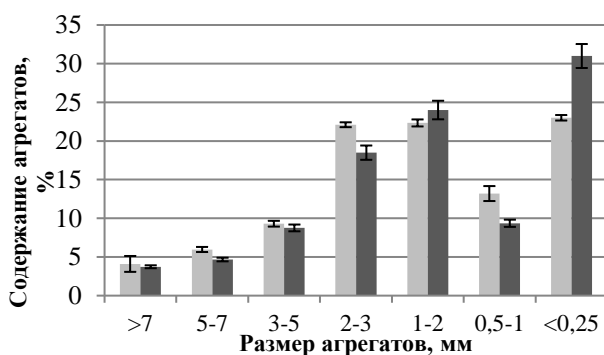
**Динамика водоустойчивых свойств чернозема обыкновенного в зависимости от предшественников.** Одним из основных показателей устойчивости почвенных агрегатов к процессам деградации является их водоустойчивость. Наиболее ценные водоустойчивые агрегаты фракции размером 0,5-7,0 мм преобладают под паром и озимой пшеницей, размещенной после кукурузы (рис. 7).



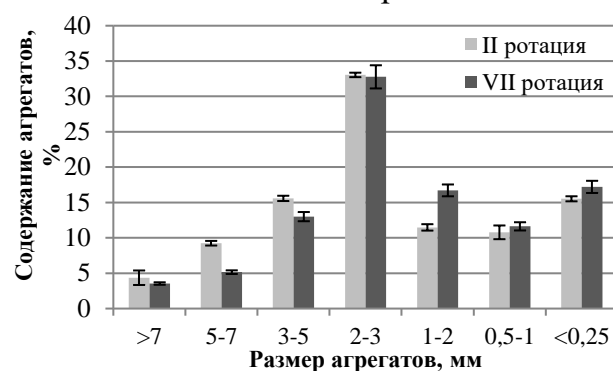
Чистый пар



Озимая пшеница по предшественнику чистый пар



Озимая пшеница по предшественнику кукуруза



Многолетние травы

Рисунок 7 – Динамика содержания водоустойчивых агрегатов (просеивание в воде) в слое почвы 0-30 см в конце второй (II) и в конце седьмой (VII) ротации севооборота, %, 1990-2021 гг.

За семь ротаций севооборотов отмечено уменьшение процентного содержания фракций размером 2-3 мм (20,6-32,5 %, против 14,9-20,9 % в седьмую ротацию) и увеличение доли фракции более мелкого размера 1-2 мм (23,5-32,1 %). Не изменилась структура почвы под многолетними травами. Отмечена тенденция к уменьшению количества агрономически ценных водоустойчивых агрегатов с 71,3-78,7 до 62,3-74,9 % и крупно-глыбистой фракции >7 мм, при этом доля фракции размером <0,25 мм увеличивается с 19,1-24,9 до 22,3-34,9 %. При этих изменениях наблюдалось уменьшение  $K_{водпр}$  с 2,5-3,7 до 1,7-3,2, а также снижение величины СВД с 1,9-2,0 до 1,7-1,9 мм, что существенно ниже оптимума (3-5 мм).

**Динамика водоустойчивых свойств чернозема обыкновенного в зависимости от агротехнологии возделывания сельскохозяйственных культур.** Применение почвозащитной обработки значительно отразилось на структурно-агрегатном составе чернозема обыкновенного и привело к увеличению доли фракций размером >7 мм на 7,9-62,0 %, мезоагрегатов (5-2 мм) на 4,4-33,3 % в чистом пару, под озимой пшеницей и многолетними травами. Количество фракций размером от 1-2 до <0,25 мм уменьшилось на 4,4-20,2 %. Коэффициент водопрочности, количество водоустойчивых и средневзвешенный диаметр водоустойчивых агрегатов при использовании чизельной обработки был больше, чем при отвальной.

**Изменение агрофизических показателей чернозема обыкновенного в результате проявления процессов деградации.** При возникновении стока воды и смыва часть почвы перемещается вниз по склону, образуя наносы. В кольматационных наносах у подножия склона доля агрегатов растет с меньшим размером фракций. Крупно глыбистые агрегаты практически отсутствовали (0,2 %), а вклад мелких фракций размером 1–<0,25 мм увеличился по сравнению с чистым паром на 93,5-234,6 % (сухое просеивание), и на 41,1-55,0 % при просеивании в воде (0,5-1 мм и <0,25 мм). Это также свидетельствует о проявлении деградационных процессов за счет водной эрозии.

**Анализ агрофизических показателей методом главных компонент.** Большое количество показателей затрудняет проведение всесторонней оценки результатов исследования, поэтому для понижения размерности данных, поиска неявных взаимосвязей и выявления показателей, вносящих наибольший вклад в различия между объектами, а также классификации переменных был использован анализ главных компонент (ГК). Первые две ГК описывают 74,6 % всех случаев. На первую компоненту (ГК1) приходится 51,7 % дисперсии, на вторую (ГК2) – 22,9 % (рис. 8).

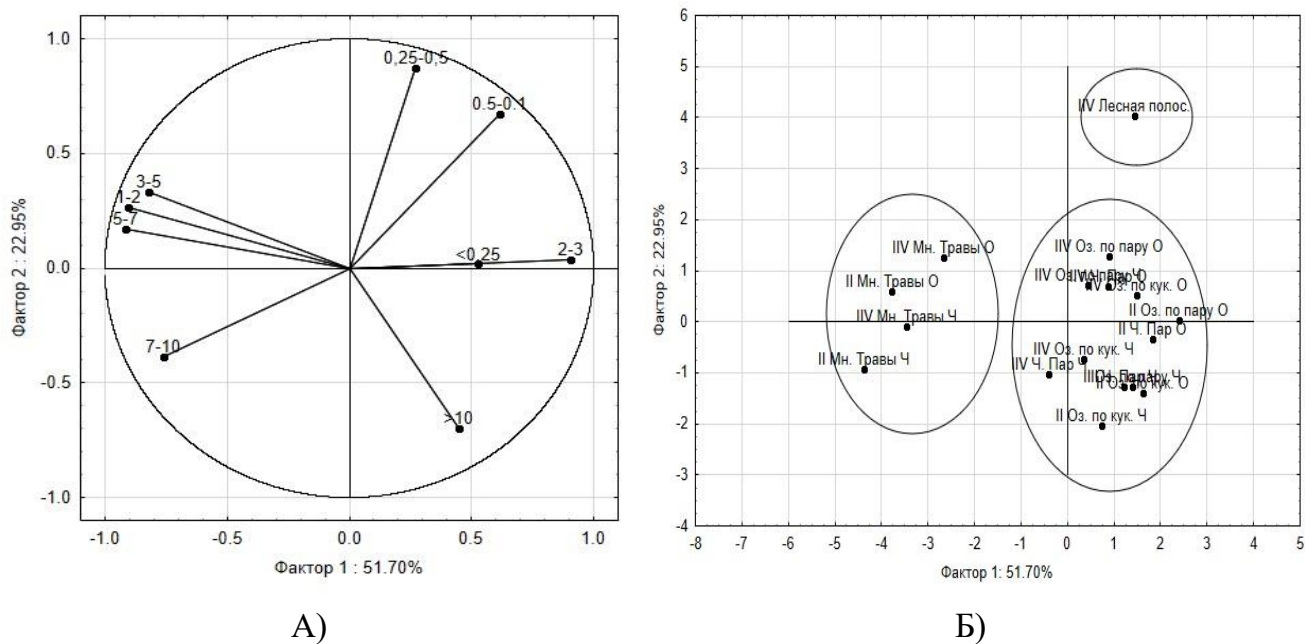


Рисунок 8 – Факторные нагрузки (А) и расположение в пространстве первых двух главных компонент (Б) на основе корреляции состава структурных отдельностей по результатам «сухого» просеивания в конце второй (II) и седьмой (VII) ротаций севооборотов и приемов обработки почвы (Ч – чизельная и О – отвальная).

Наибольший вклад в ГК1 вносят фракции размером 7-10 мм (-0,76), 5-7, (-0,92), 3-5 мм (-0,82), 2-3 мм (0,90), и 1-2 мм (-0,91) и все они имеют отрицательную направленность за исключением фракции размером 2-3 мм. С уменьшением фракций размером 10-3 мм и 1-2 мм увеличивается количество крупно-глыбистых агрегатов и пылеватых фракций.

Наибольший вклад в дисперсию ГК2 вносят крупно глыбистая фракция размером (>10 мм) и мелкие фракции размером 0,25-0,5 мм (0,87). При ежегодной обработке почвы отмечается разрушение макроагрегатов до мезоагрегатов, о чем свидетельствует знак

направленности процесса для фракций размером  $>10$  и  $7-10$  мм в ГК2. Процессы деградации характеризует ГК2, выражающиеся в разрушении крупно-глыбистых агрегатов и увеличении вклада фракций мелкого размера ( $0,5-1,0$  мм и  $0,25-0,5$  мм).

На основании анализа расположения почвенных отдельностей различных агрофонов в системе координат ГК1 были выделены 2 крайних варианта: чистый пар и озимая пшеница по всем ротациям и вторая группа – многолетние травы. По ГК2 можно условно выделить группу агрочерноземов и располагающуюся отдельно от всех почв на водоразделе под лесной полосой. Сгруппированное расположение почвенных отдельностей различных предшественников в системе координат подтверждает влияние интенсивности воздействия агротехнологий на почву. Систематическое воздействие на почву обрабатывающих орудий в течение длительного срока разрушает почвенную структуру, нарушая межагрегатные связи. Почва под многолетними травами и лесной полосой менее подвержена воздействию и более оструктурена, что подтверждает компактное расположение в системе координат и большие значения координат факторов для наблюдений (по модулю), чем в чистом пару и под озимыми пшеницами.

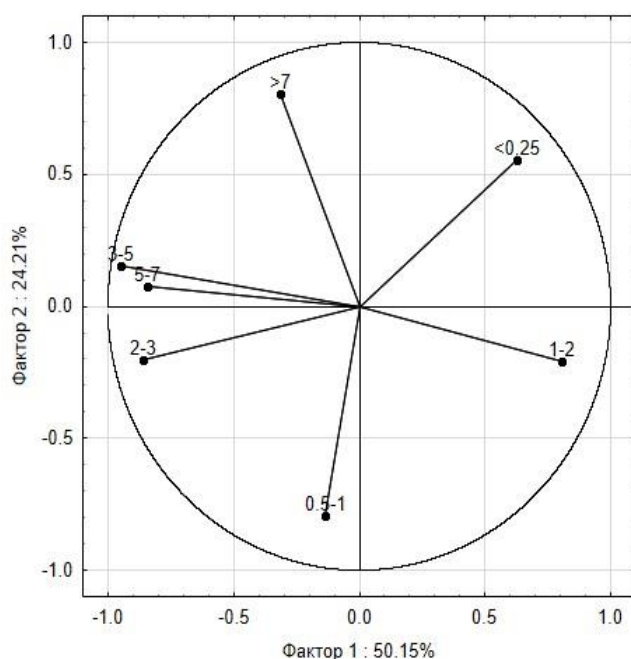
Значения координат факторов чизельной и отвальной обработки почвы размещаются близко друг к другу и это подтверждает предположение о несущественном влиянии приемов обработки почвы.

*Анализ водоустойчивых агрегатов методом главных компонент.* Процессы структурообразования в черноземах обыкновенных динамичны и по мере их формирования растёт водопрочность структурных агрегатов (рис. 9).

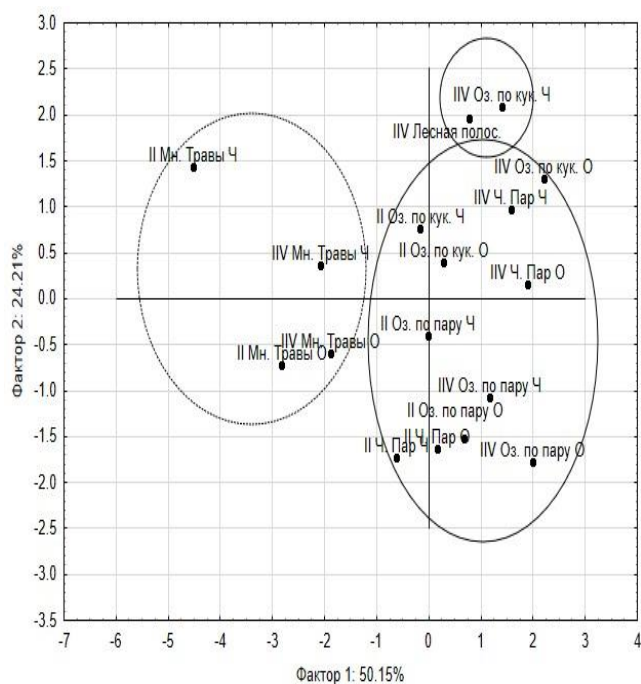
Суммарный процент для двух первых ГК равнялся  $74,4$  %: (ГК1 –  $50,2$  %, ГК2 –  $24,2$  %). При рассеивании почвы в воде были выявлены значительные корреляции факторных нагрузок с ГК1 для водоустойчивых агрегатов размером  $5-7$  мм ( $-0,85$ ),  $3-5$  мм ( $-0,95$ ),  $2-3$  мм ( $-0,86$ ) и  $1-2$  мм ( $0,81$ ),  $<0,25$  мм ( $0,62$ ). В результате длительного воздействия сельскохозяйственных орудий на чернозем обыкновенный увеличивается количество пылеватых частиц и теряется водоустойчивость почвы.

Для ГК2 наибольшее значение имела фракция размером  $>7$  мм ( $0,81$ ) и  $0,5-0,25$  мм ( $-0,79$ ). Из приведенных данных можно оценить вклад агрегатов в распределение различных агрофонов в пространстве ГК. Здесь также просматривается аналогичная зависимость: при уменьшении доли макроагрегатов увеличивается вклад пылеватой фракции.

Частицы почвы диаметром  $>7$  мм и  $<0,25$  мм находятся в области положительных значений, а водоустойчивые мезоагрегаты расположены в отрицательной области. Это подтверждает сделанное ранее предположение, что сначала восстанавливается структура водоустойчивых агрегатов, а затем формируются структурные отдельности сухих агрегатов.



А)



Б)

Рисунок 9 – Факторные нагрузки (А) и расположение в пространстве первых двух главных компонент (Б) на основе корреляции водоустойчивых агрегатов, по результатам просеивания в воде почвы различных агрофонов, приемов обработки почвы (Ч – чизельная и О – отвальная) в конце второй (II) и седьмой (VII) ротации севооборотов.

Водоустойчивость почвенных частиц характеризует ее эрозионную устойчивость. По первой ГК, имеющей наибольшую дисперсию, все изучаемые агрофоны можно условно разделить на две группы. В первую группу отнесены агрочерноземы с интенсивной обработкой почвы, а во второй группе располагаются многолетние травы. По второй ГК отдельно от всех располагаются структурные отдельности под лесной полосой и озимой пшеницей по кукурузе.

**Изменение плотности чернозема обыкновенного.** Плотность сложения пахотного слоя почвы при всех изучаемых системах обработки находится в оптимальных пределах для возделывания сельскохозяйственных культур (менее  $1,3 \text{ г/см}^3$ ). Плотность чернозема обыкновенного, обрабатываемого чизельным плугом, в слое 0-30 см больше, чем при отвальной вспашке на  $0,01-0,06 \text{ г/см}^3$  во все сроки наблюдения ( $p > 0,05$ ), но за счет глубоких щелей и отсутствия плужной подошвы на вариантах с чизелем лучше впитывается влага и водопроницаемость выше.

**Изменение водного режима чернозема обыкновенного.** Эрозионная устойчивость озимого поля определяется способностью усваивать осадки холодного периода, которые аккумулируются почвой в зависимости от влагообеспеченности года в порядке убывания: «очень засушливые» → «засушливые» → «средне засушливые и влажные». Наибольшее количество осадков холодного периода аккумулирует чистый пар 34,6-52,6 %, а наименьшее – озимая пшеница по чистому пару 10,3-13,5 %, непаровые предшественники озимой пшеницы занимают промежуточное положение.

**Изменение водопроницаемости чернозема обыкновенного.** Водопроницаемость почвы снижается по мере увеличения плотности верхнего слоя и уменьшения количества

водоустойчивых агрегатов. С этим процессом в значительной мере связана возможность предотвращения стока талой и ливневой воды. Более высокая водопроницаемость наблюдалась в паровом поле и под озимой пшеницей по чистому пару при чизельной обработке почвы (2,82-4,01 мм/мин), возрастая на 17,9-32,9 % за период от времени возобновления весенней вегетации до фазы полной спелости озимой пшеницы.

В результате анализа выявлена обратная зависимость впитывающей способности от плотности сложения почвы ( $r = -0,7-0,9$ ), продуктивной влаги ( $r = -0,6-0,9$ ) и прямая от количества водоустойчивых агрегатов ( $r = 0,7-0,9$ ). Полученные уравнения имеют существенную значимость ( $R^2 = 0,72-0,91$ ) и могут быть использованы для определения водопроницаемости почвы расчетным путем при разработке приемов обработки склоновых земель, позволяющих предотвратить сток воды и смыв почвы; при проектировании систем земледелия на ландшафтной основе и организации мелиоративных мероприятий.

**Динамика накопления снега на склонах.** Одним из факторов при накоплении почвенной влаги в зимний период, является высота снегового покрова, а также запасы воды в снеге. Данные приведены в таблице 2.

Установлена закономерность увеличения высоты снегового покрова по мере снижения интенсивности основной обработки, достигая наибольших значений в варианте с чизельной обработкой. Наибольшее количество воды в снеге было на полях многолетних трав (316,5-338,7 т/га) и озимой пшеницы (265,0-281,5 т/га), а наименьшее – на зяби (225,4-245,4 т/га).

Таблица 2 – Высота снегового покрова и запас воды в снеге в зависимости от предшественника и приемов обработки почвы к началу снеготаяния на эрозионно-опасном склоне, 1990–2022 гг.

Показатель	Приемы обработки почвы	Предшественник		
		Озимая пшеница	Зябрь	Многолетние травы
Высота снегового покрова, мм	Отвальная	10,5±1,3	9,1±1,2	12,4±1,5
	Чизельная	11,0±1,3	10,0±1,2	13,3±1,6
Запас воды в снеге, т/га	Отвальная	265,0±40,8	225,4±36,9	316,5±47,9
	Чизельная	281,5±41,9	240,6±38,0	338,7±49,9

Использование чизельной обработки на зяби приводит к увеличению высоты снегового покрова на 9,5 % ( $p < 0,05$ ) по сравнению с отвальной обработкой. Влияние чизельной обработки на высоту снегового покрова на полях, занятых зимующими культурами, незначительно (4,7-7,3 %). Запасы воды в снеге находятся в тесной зависимости от высоты снегового покрова ( $r = 0,85-0,87$ ) и его плотности ( $r = 0,85-0,90$ ).

**Влияние ливней на развитие эрозионных процессов черноземов обыкновенных.** В течение длительного периода наблюдений частота выпадения ливней была не велика. В последние 3–5 лет эрозионных процессов в период таяния снега либо совсем не отмечено, либо они не носили разрушительный характер, но смывы и размывы ливневой водой имели место (рис. 10).

Интенсивность ливней колебалась в пределах от 1,01 мм/мин до 2,33 мм/мин. Сток

воды и смыв почвы зависел в большей степени от количества выпавших осадков ( $r=0,57$ ;  $r=0,67$ ) имеющих среднюю тесноту связи, чем от интенсивности ливней ( $r=0,36$ ;  $r=0,26$ ). Этот факт еще раз подтверждает, что эрозионные процессы начинают проявляться при низкой водопроницаемости и полной влагоемкости почвы.

Количество смытой почвы напрямую зависит от стока и величины осадков за один ливень. Однако смыв почвы ограничен допустимыми пределами от 2,9-53,6 т/га, при этом сток колеблется в пределах от 7,5 до 44,4 мм, а количество воды выпавшей за один ливень лежит в пределах 20,2-53,5 мм. При увеличении одного из этих показателей смыв почвы может увеличиться до 60 т/га.

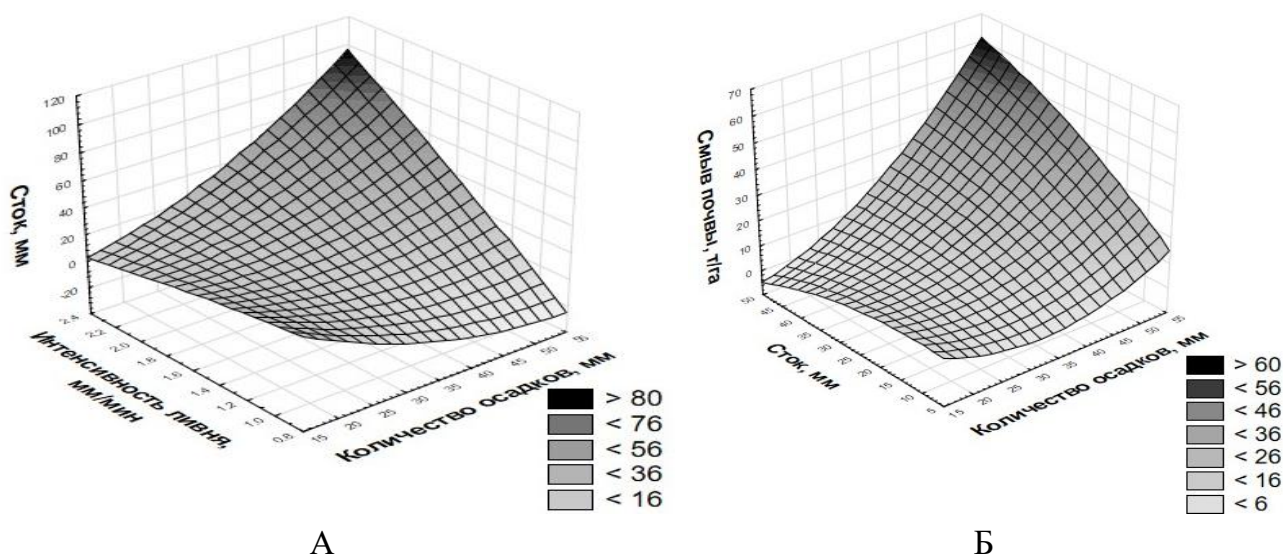


Рисунок 10 – Зависимость стока (А) и смыва почвы (т/га) (Б) от интенсивности ливней и количества осадков, выпавших за один ливень (мм), 1990-2022 гг.

**Гребнистость почвы** на отвальной вспашке в среднем больше на 7,7 %, чем при чизельной обработке. Чередование в полосах гребнистой вспашки и обработки с оставлением на почве стерни является почвозащитным приемом.

**Противоэрозионная устойчивость корневых систем.** В противоэрозионном плане в первую очередь представляет интерес масса корней, размещенная в пределах пахотного слоя почвы. Во-первых, посредством того, что они являются живым «армирующим» элементом почвенных частиц, во-вторых, зона активного действия усваивающих корней сильнее иссушает почву, что способствует дополнительному поглощению воды и, в-третьих, органические и минеральные выделения корневых систем, а затем частично и продукты их минерализации способны в определенной степени «склеивать» почвенные частицы.

Наиболее развита корневая система у многолетних трав, способных за 2-3 года жизни сформировать мощную массу (6,56-7,24 т/га). Значительно уступает ей корневая система озимой пшеницы (1,11 т/га), срок жизни которой составляет вегетационный период, длящийся 270-310 дней, включая зимние месяцы.

Для определения массы корневой системы нами была разработана полезная модель: «Устройство для отбора и фиксирования почвенных проб и корневой системы

растения» (Патент № RU 119108 U1, 2012) и «Способ определения массы корневой системы пшениц» (Патент № RU 2716576 C1, 2020). Это устройство позволяет изучать корневые системы растений с учетом их размещения по слоям почвы и оценивать их с точки зрения эрозионной устойчивости.

Корневая система озимой пшеницы, высеянной по чистому пару и непаровым предшественникам, где условия влагообеспеченности были неодинаковыми, имела различный габитус, а главное, разную глубину размещения корней в почве (таблица 3).

Таблица 3 – Размещение корневой системы озимой пшеницы, высеянной по различным предшественникам в севообороте (фаза выхода в трубку), %, 2007-2009 гг.

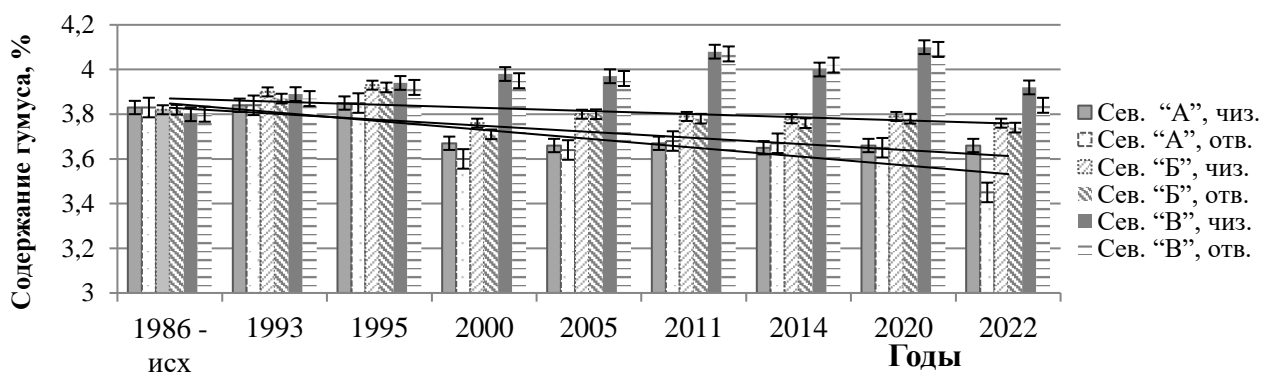
Размещение корней в слое почвы	Предшественник и обработка почвы		
	пар чистый, отвальная обработка на 25–27 см.	кукуруза на силос, дискование 10–12 см	озимая пшеница, дискование 8–10 см.
0–10 см	28,3	42,4	46,1
10–20 см	29,4	31,8	32,2
20–30 см	22,9	14,2	13,8
30–50 см	9,3	5,4	3,4
Глубже 50 см	10,2	6,2	4,5

У озимой пшеницы, размещенной по чистому пару, более 80 % массы корневой системы размещается в слое почвы 0-30 см. По непаровым предшественникам основная масса корневой системы (74,2-78,3 %) размещается в поверхностном слое 0-20 см.

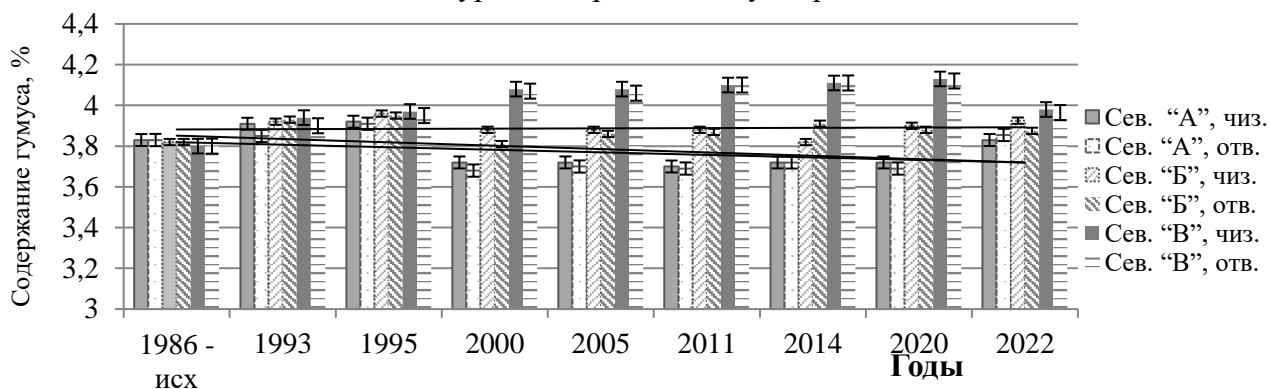
## **6. Влияние агротехнических приемов на показатели плодородия чернозема обыкновенного среднеэродированного в системе контурно-полосной организации территории**

*Динамика гумуса в длительном опыте в зависимости от конструкции севооборотов и удобрений.* Длительное использование земель сельскохозяйственного назначения приводит к изменению плодородия почвы. При закладке длительного опыта исходное содержание гумуса в почве составляло 3,8-3,83 %. К концу седьмой ротации севооборотов возделывание сельскохозяйственных культур без внесения удобрений привело к потере гумуса в различных количествах (рис. 11).

Внесение органо-минеральных удобрений в средних дозах ( $N_{46}P_{30}K_{30}+5$  т навоза) в севообороты «А» и «Б» не позволяет поддерживать содержание гумуса на исходном уровне. В севообороте с 40 % многолетних трав плодородие остается на исходном уровне (3,97 %). Увеличение дозы внесения удобрений в полтора раза ( $N_{84}P_{48}K_{48}+8$  т навоза) поддерживает содержание гумуса в пределах исходных значений в севооборотах «А» и «Б» (3,86 и 3,88 %) соответственно. Увеличение доли многолетних трав до 40 % при этой же дозе внесения удобрений приводит к расширенному воспроизводству гумуса (4,11 %).



«1-й» уровень применения удобрений



«2-й» уровень применения удобрений

Рисунок 11 – Динамика содержания гумуса в слое почвы 0-30 см в севооборотах различной конструкции в зависимости от уровней применения удобрений, %, 1990-2022 гг.

Исключение навоза из системы удобрений (6-я ротация севооборотов) сопровождается тенденцией снижения содержания гумуса до исходных значений при внесении удобрений в средних и повышенных дозах с 4,02 до 3,84 % и с 4,12 до 3,97 % соответственно.

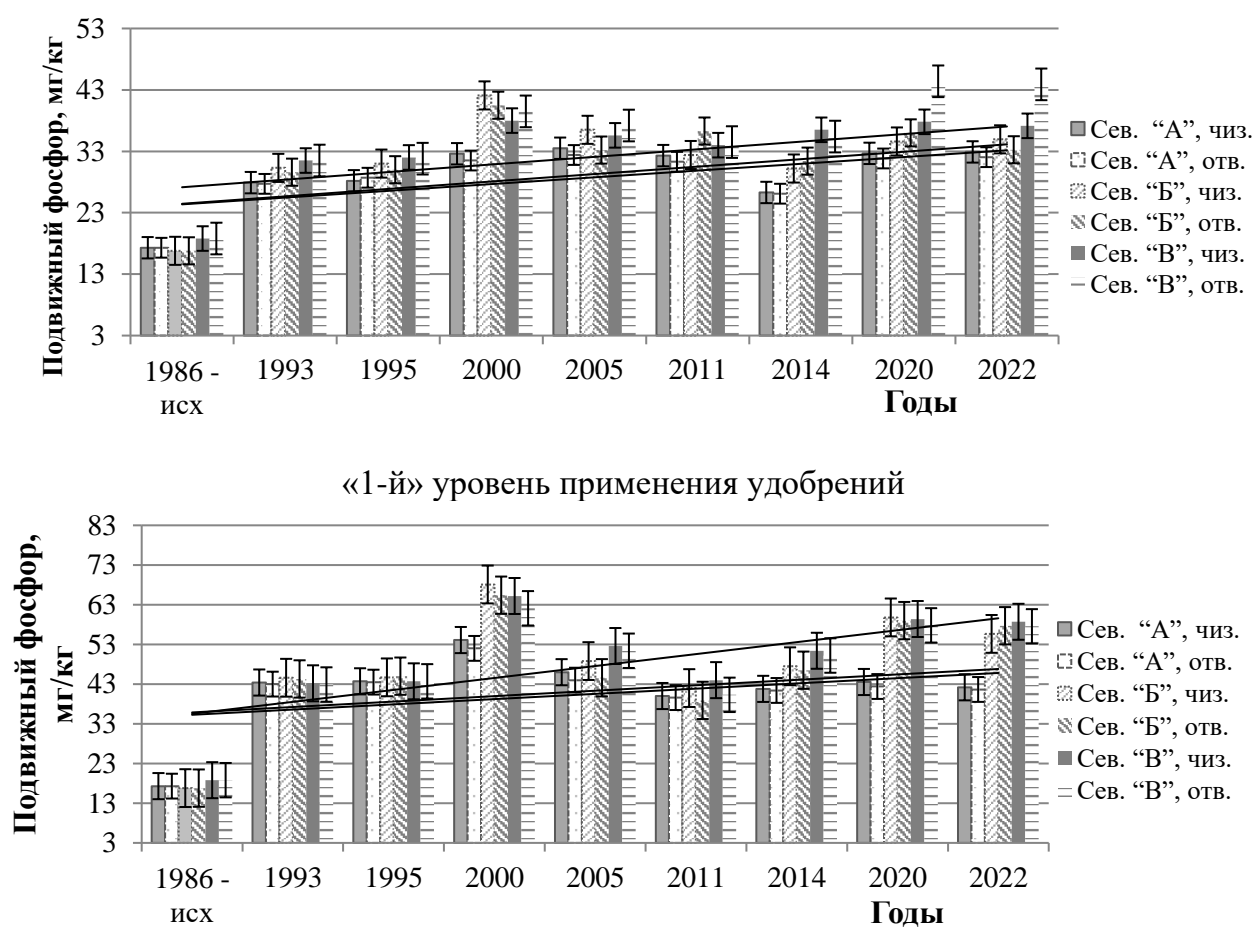
**Динамика гумуса в агрегатах различной размерности.** Локализация органического вещества в агрегатах различных по размеру значительно отличается. Содержания гумуса в почвенных агрегатах агрочерноземов изменяется незначительно – в пределах от 3,58–3,65±0,06 %. В черноземе на водоразделе процентное содержание гумуса увеличивается в зависимости от размера агрегатов, от наименьшего в макроагрегатах размером >10-7 мм (4,64±0,11 %) до максимального в микроагрегатах диаметром 0,5-<0,25 мм (6,54±0,17 %).

**Динамика гумуса в зависимости от агротехнологии возделывания сельскохозяйственных культур.** Разница в содержании гумуса при использовании почвозащитной (чизельной) обработки почвы по сравнению с отвальной колебалась в пределах от 0,01 % до 0,08 % и не превышала ошибки опыта ( $p > 0,05$ ).

**Динамика минерального азота в зависимости от конструкции севооборотов, удобрений и агротехнологии возделывания сельскохозяйственных культур.** Для питания растений наиболее важен азотный режим почвы, меняющийся от фазы развития растений. Содержание минерального азота ( $N-NO_3 + N-NH_4$ ) в пахотном слое почвы на

естественном уровне питания увеличивалось от фазы возобновления весенней вегетации озимой пшеницей (4,3-5,8 мг/кг) до полной спелости (19,2-30,6 мг/кг). При внесении в почву повышенных доз азотных удобрений его содержание увеличилось на 28,0-75,0 %. Приемы обработки почвы значимого влияния на азотный режим не оказывали.

**Динамики подвижного фосфора в зависимости от конструкции севооборотов и удобрений.** Фосфорный режим почвы, также наиболее важен для питания растений. Отмечено снижение содержания подвижного фосфора на естественном уровне питания в пахотном слое с 17,3-18,8 мг/кг при закладке опыта, до 14,7-16,0 мг/кг за 7 ротаций севооборотов (рис. 12).



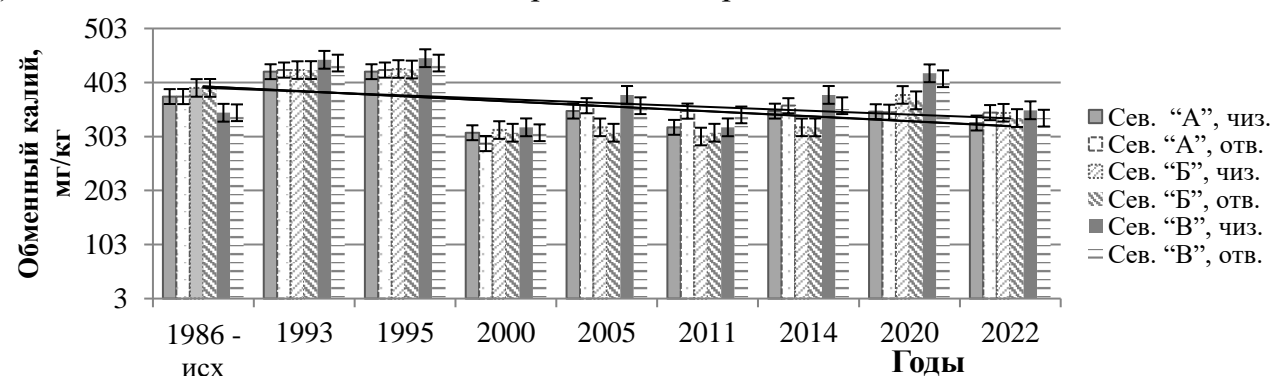
«2-й» уровень применения удобрений

Рисунок 12 – Динамика содержания подвижного фосфора в слое почвы 0-30 см в севооборотах различной конструкции в зависимости от уровней применения удобрений мг/кг, 1986-2022 гг.

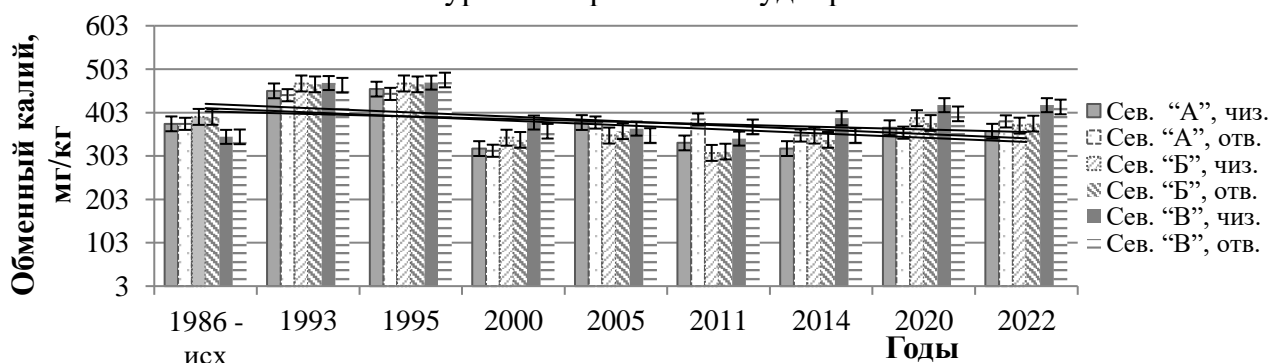
Систематическое внесение в течение длительного периода средних доз удобрений привело к увеличению подвижного фосфора до 32,1-43,9 мг/кг, повышенных доз – до 41,7-57,7 мг/кг. По многолетним наблюдениям содержание фосфора больше на 7,7-38,5 % и на 37,0-38,2 % в севообороте с 20 % и 40 % многолетних трав, по сравнению с севооборотом, где травы отсутствуют, что еще раз подтверждает почвозащитную роль многолетних трав. С 2005 года дозы внесения фосфорных удобрений в севооборотах были сокращены на 30 %, и это отразилось в снижении его содержания.

**Динамика подвижного фосфора в зависимости от агротехнологии возделывания.** Использование почвозащитной обработки почвы сократило потери почвы в результате процессов деградации, а вместе с ней и потери подвижного фосфора в севообороте «А» на 0,1-2,1 мг/кг (0,7-4,5 %); в севообороте «Б» на 0,1-4,2 мг/кг (0,7-9,4 %); в севообороте «В» на 0,1-6,8 мг/кг (0,9-9,2 %); по сравнению с отвальной обработкой почвы, разница была статистически незначима ( $p>0,05$ ).

**Динамика обменного калия в зависимости от конструкции севооборотов и удобрений** (рис. 13). Исходное содержание обменного калия при закладке опыта в слое 0-30 см почвы колебалось в пределах от 347 до 393 мг/кг. При естественном плодородии содержание  $K_2O$  за семь ротаций севооборота уменьшилось до 244-267 мг/кг (на 17,5-35,3 %) с большими значениями в севообороте «А», в сравнении с исходным.



«1-й» уровень применения удобрений



«2-й» уровень применения удобрений

Рисунок 13 – Динамика содержания обменного калия в слое почвы 0-30 см в севооборотах различной конструкции в зависимости от уровней применения удобрений и приемов обработки почвы, мг/кг, 1990-2022 гг.

Систематическое внесение калийных удобрений в средних дозах позволило поддерживать содержание калия на уровне высокой обеспеченности – 337-347 мг/кг. Внесение повышенных доз удобрений увеличило содержание  $K_2O$  в пахотном слое почвы до 383-416 мг/кг (на 1,5-19,9 %) Внесение удобрений в средних дозах в севообороты с долей многолетних трав 20 и 40 % увеличивало содержание обменного калия на 5,8-8,9 % и на 17,8-20,3 %, по сравнению с контрольным севооборотом. Увеличение дозы внесения удобрений в полтора раза увеличивало содержание обменного калия в севооборотах «Б» и «В» до 373-378 мг/кг (на 6,0-6,3 %) и до 416-420 мг/кг (на 14,2-16,7 %), соответственно.

**Динамика обменного калия в зависимости агротехнологии возделывания сельскохозяйственных культур.** Применение почвозащитной обработки почвы в сравнении с отвальной обработкой, несущественно увеличивало содержание  $K_2O$  от 13 до 40 мг/кг ( $p>0,05$ ).

**Динамика водородного показателя.** За семь ротаций севооборотов кислотные свойства черноземов обыкновенных были в области нейтральных значений 6,7–7,3 ( $p>0,05$ ). Обработки почвы значимого влияния на изменения рН чернозема обыкновенного не оказывали.

## 7. Прогноз динамики содержания гумуса и основных элементов питания на эрозионно-опасных склонах черноземов обыкновенных

**Прогноз динамики содержания гумуса.** Для оценки развития ситуации в черноземах обыкновенных среднеэродированных содержания гумуса и основных элементов питания растений был сделан долгосрочный прогноз до 2122 года с использованием АНС (рис. 14).

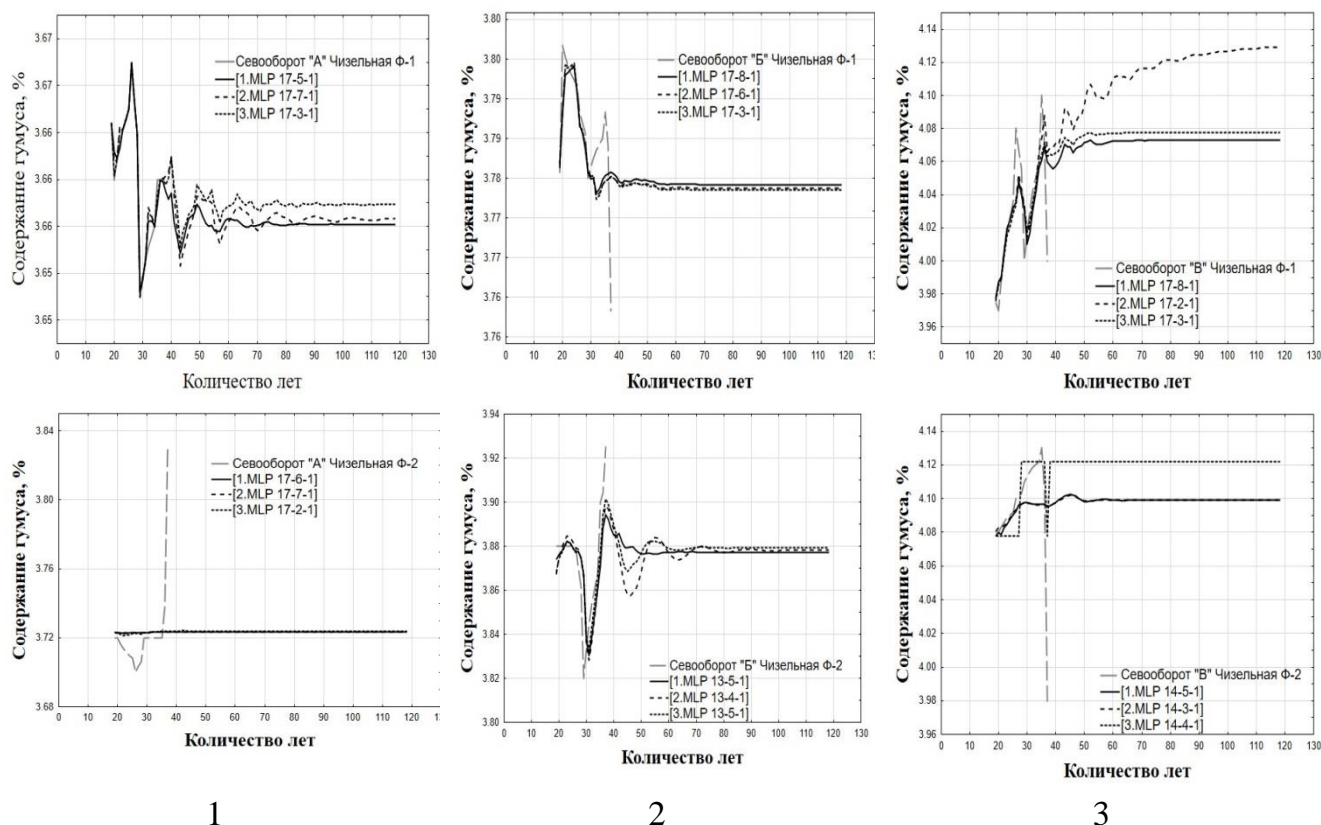


Рисунок 14 – Проекция временного ряда до 2122 года содержания гумуса в черноземах обыкновенных в севооборотах различной конструкции и применении чизельной обработки почвы (1 – севооборот «А»; 2 – севооборот «Б»; 3 – севооборот «В»), %.

Внесение удобрений в средних дозах не позволяет поддерживать содержание гумуса в севообороте с чистым паром и в севообороте с 20 % многолетних трав на исходном уровне, а в севообороте с 40 % многолетних трав содержание гумуса практически не меняется. Систематическое внесение удобрений в повышенных дозах в севообороте с чистым паром и 20 % многолетних трав поддерживает содержание гумуса

на исходном уровне (3,87 %), а в севообороте с 40 % многолетних трав отмечена положительная динамика в его накопления (4,01%).

**Прогноз динамики содержания подвижного фосфора (рис. 15).**

Составленный прогноз содержания подвижного фосфора в вариантах без внесения удобрений подтверждает общую тенденцию снижения до 11,5-18,6 мг/кг (или на 12,5-15,4 %) во всех севооборотах. Внесение удобрений в средних дозах поддерживает содержание подвижного фосфора в почве на уровне 25,7-33,3 мг/кг. Увеличение дозы внесения удобрений в полтора раза повышает содержание подвижного фосфора во всех севооборотах до 40,3-47,6 мг/кг.

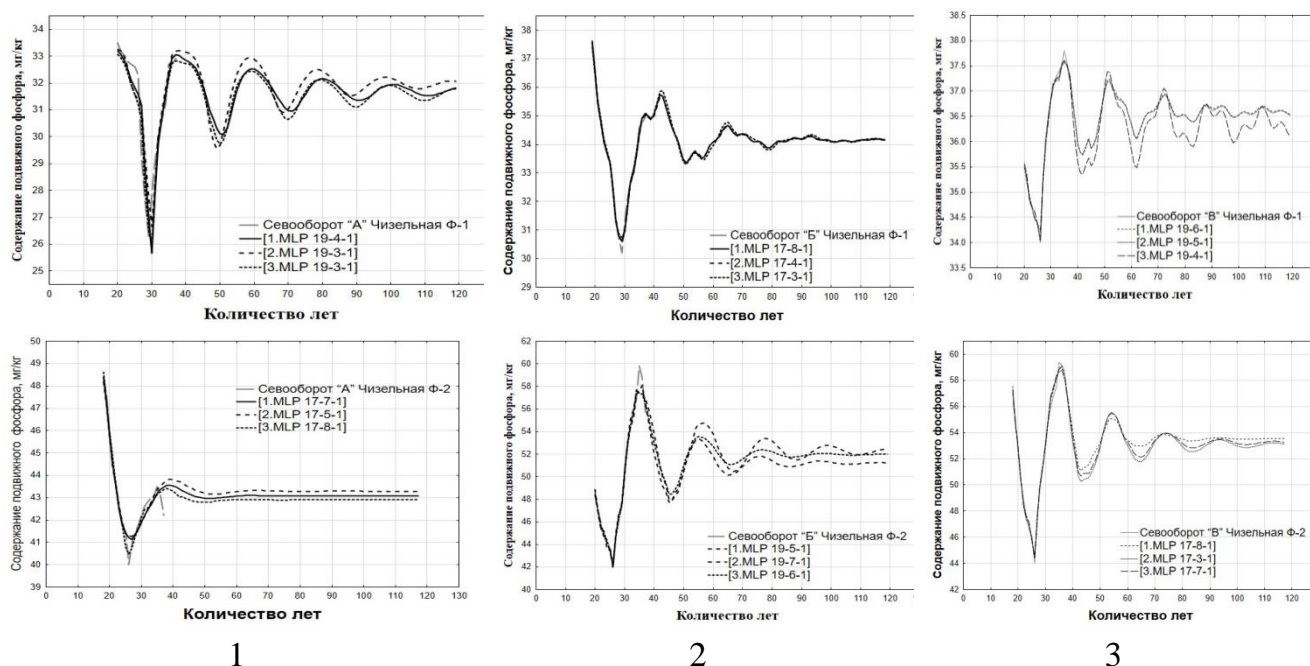
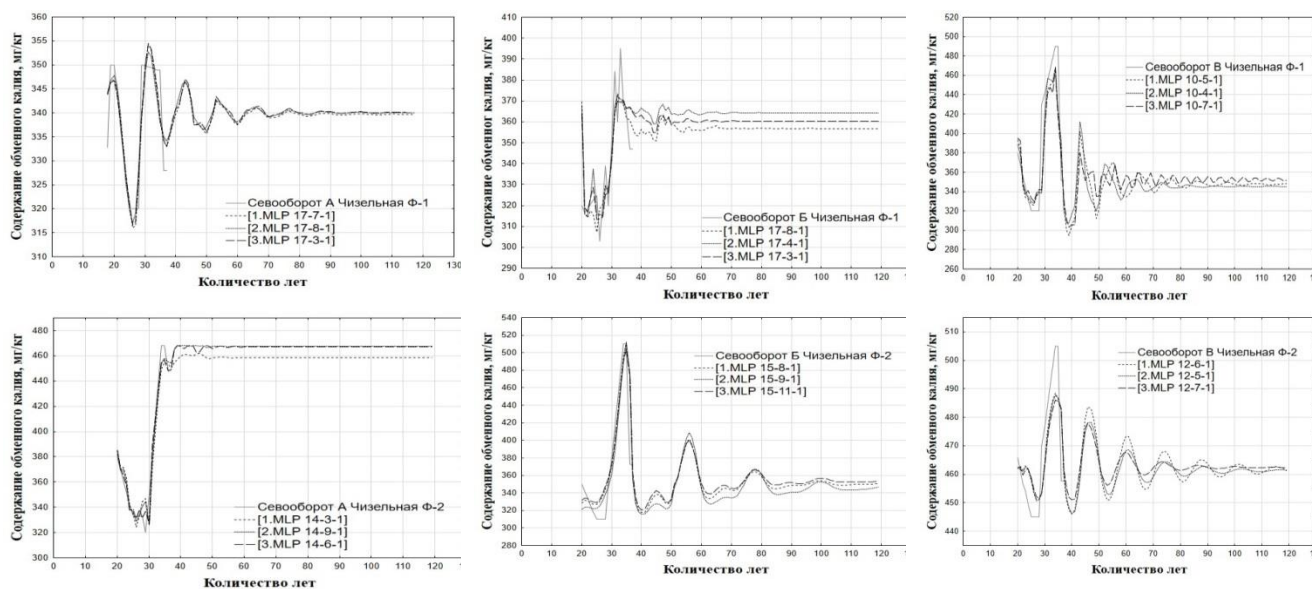


Рис. 15 – Проекция временного ряда до 2122 года содержания подвижного фосфора в черноземах обыкновенных в севооборотах различной конструкции и применении чизельной обработки почвы (1 – севооборот «А»; 2 – севооборот «Б»; 3 – севооборот «В»), мг/кг.

**Прогноз динамики содержания обменного калия.** При закладке опыта исходное содержание обменного калия колебалось в пределах от 347 до 393 мг/кг. В результате выноса с урожаем содержание калия снизилось до минимальных значений 218-290 мг/кг в вариантах естественного плодородия (рис.16).

При внесении удобрений в средних дозах во все севообороты отмечены колебания в содержании обменного калия в первые годы составления прогноза, а в последующем содержание остается неизменным на уровне 352-396 мг/кг.

Увеличение дозы внесения удобрений в полтора раза повышает содержание обменного калия до 385-421 мг/кг. Приемы обработки почвы незначительно влияли на предсказанные значения гумуса и основных элементов питания, в одних случаях преимущество имела отвальная обработка, в других – чизельная, но в обоих случаях разница не превышала 5,0 %.



1

2

3

Рис. 16 – Проекция временного ряда до 2122 года содержания обменного калия в черноземах обыкновенных в севооборотах различной конструкции и применении чизельной обработки почвы (1 – севооборот «А»; 2 – севооборот «Б»; 3 – севооборот «В»), мг/кг.

## 8. Баланс гумуса и основных элементов питания в длительном опыте на черноземах обыкновенных среднеэродированных

### *Баланс гумуса в зависимости от конструкции севооборотов и удобрений.*

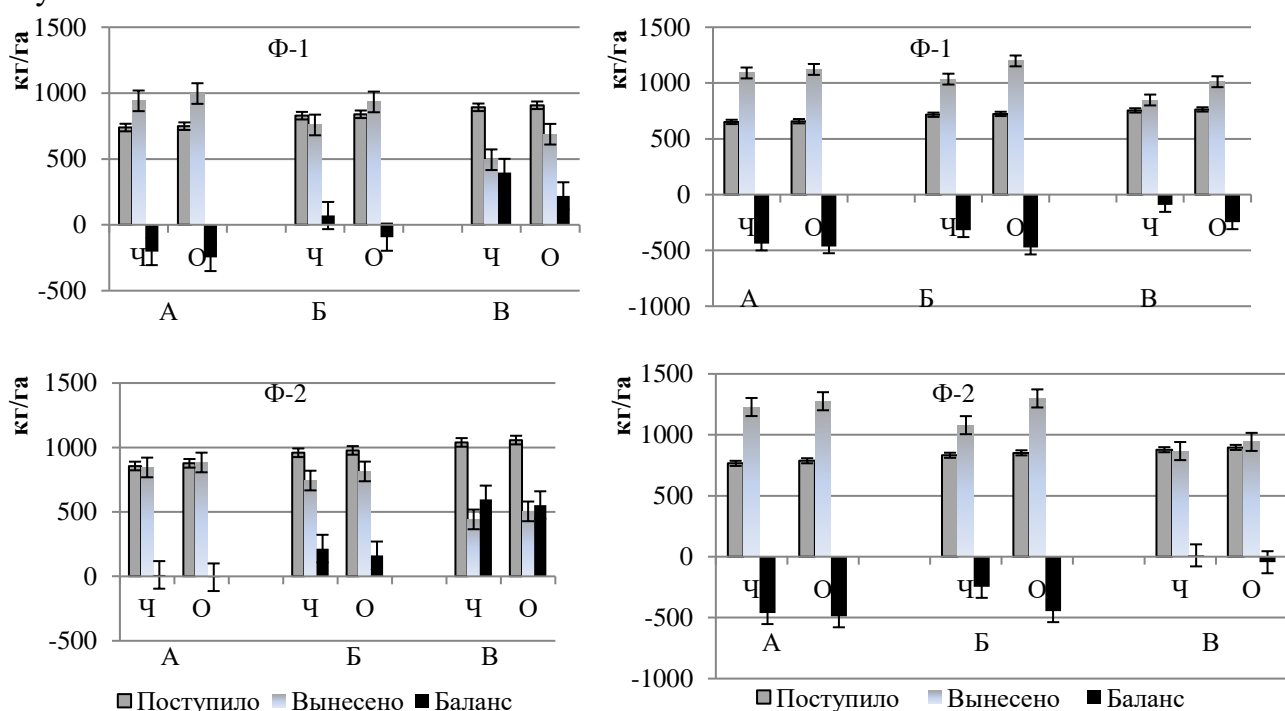
Гумусный режим чернозема обыкновенного определяет плодородие почвы и складывается из выноса с отчуждаемой продукцией и потерями со стоком и смывом. Расчет баланса гумуса с 1990 по 2013 год в севооборотах различной конструкции и внесении навоза КРС в дозе 5 и 8 т/га показал, что накопление и расход гумуса в почве зависит от ряда факторов. С 2014 г. навоз из системы внесения удобрений был исключен (рис. 17).

В севообороте «А» с долей чистого пара 20 % баланс гумуса был отрицательный, как на варианте естественного плодородия (-967 кг/га), так и при использовании различных систем органо-минеральных удобрений (-873 кг/га) и (-726 кг/га) с меньшими значениями при внесении повышенных доз удобрений. Исключение навоза из системы удобрений привело к еще большим потерям гумуса от (-1159 кг/га) на естественном уровне питания до (-818 кг/га) при внесении повышенных доз удобрений.

Введение в севооборот многолетних трав 20 % сократило потери гумуса на естественном уровне питания до (-203-248 кг/га), внесение удобрений в средних дозах поддерживало баланс гумуса на исходном уровне (70 кг/га). Увеличение дозы внесения удобрений в полтора раза позволило получить расширенное воспроизводство плодородия почвы (220-398 кг/га). Исключение навоза из системы удобрений привело к отрицательному балансу как на среднем так и повышенном уровне питания (-319-475 кг/га) и (-93-248 кг/га), соответственно.

Увеличение доли многолетних трав до 40 % позволило поддерживать нулевой баланс гумуса при отсутствии удобрений (7-11 кг/га). Внесение удобрений в средних и повышенных дозах привело к расширенному воспроизводству плодородия почвы (163-215 кг/га) и (553-597 кг/га). Отсутствие навоза непосредственно сказалась на балансе гумуса, и он стал отрицательным в варианте внесения средних доз минеральных удобрений (-247-446 кг/га). Внесение повышенных доз удобрений поддерживало нулевой баланс гумуса (11 кг/га).

Для восстановления плодородия необходимо вносить дополнительные дозы навоза: в севообороте «А» 72,6-87,3 т и в севообороте «Б» 9,4 т на «1» уровне применения удобрений. В севообороте «В», имеющим наименьшие потери со стоком и смывом почвы и за счет наличия 40 % многолетних трав баланс гумуса имеет положительную направленность и для сохранения плодородия внесение дополнительных доз навоза не требуется.



а) «Ф-1» – навоз КРС 5 т/га + N<sub>46</sub>P<sub>30</sub>K<sub>30</sub>; б) «Ф-1» – N<sub>46</sub>P<sub>24</sub>K<sub>30</sub>; «Ф-2» – N<sub>84</sub>P<sub>30</sub>K<sub>48</sub>, «Ф-2» – навоз КРС 8 т/га + N<sub>84</sub>P<sub>48</sub>K<sub>48</sub>, средние 2014-2022 гг. средние 1990-2013 гг.

Рисунок 17 – Баланс гумуса в севооборотах различной конструкции («А», «Б», «В»), различных уровнях применения удобрений и приемах обработки почвы (Ч – чизельной и О – отвальной обработки почвы), кг/га,

Использование только минеральной системы удобрений приводит к отрицательному балансу гумуса во всех севооборотах. Для восстановления плодородия необходимо вносить навоз за ротацию в количестве 82-100 т в севообороте «А», 25-48 т – в севообороте «Б» и 4-45 т – в севообороте «В».

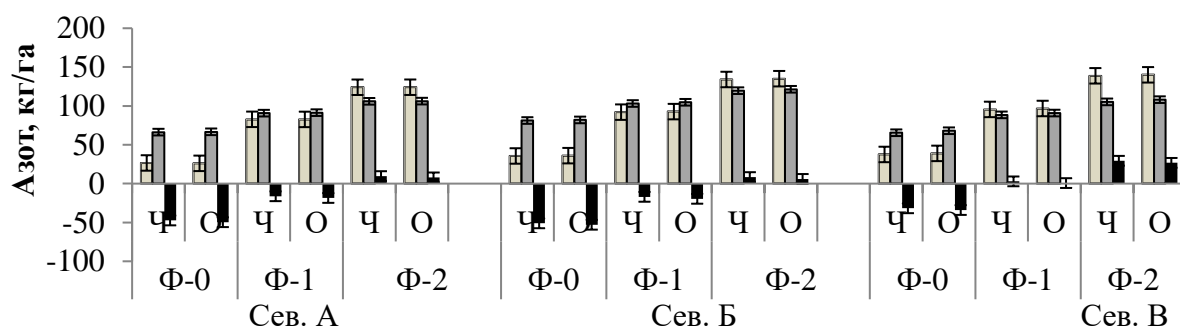
**Баланс гумуса в зависимости от агротехнологии возделывания сельскохозяйственных культур.** Использование почвозащитной обработки, по

сравнению с отвальной, сокращает потери гумуса в севообороте «А» на 6,2-9,6 %, в севообороте «Б» – на 18,2-28,0 %, в севообороте «В» – на 8,0-32,0 %.

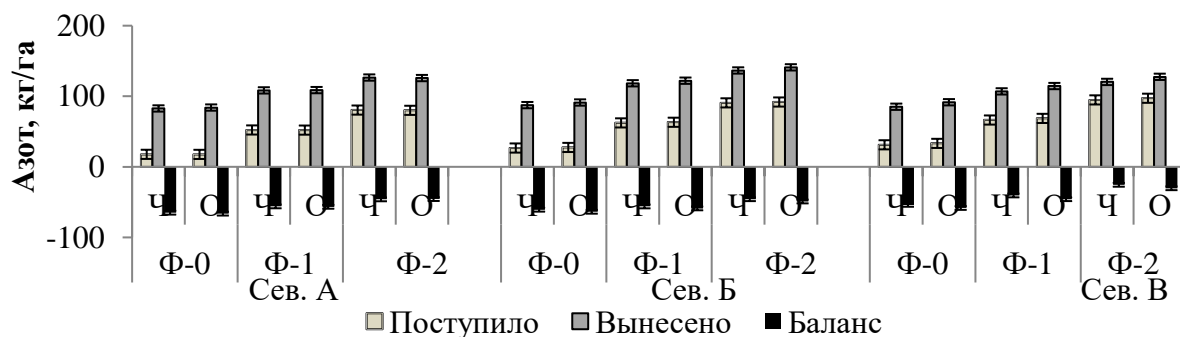
**Оценка состояния баланса гумуса в зависимости конструкции севооборота, удобрений и агротехнологии возделывания сельскохозяйственных культур.** Интенсивность баланса гумуса в севооборотах увеличивается по мере увеличения доли многолетних трав и доз внесения удобрений до 186,2-211,1 % в севообороте с 40 % многолетних трав и оценивается как «хорошая». Исключение из системы удобрений органических приводит к снижению этого показателя на 6,5-50,0 % во всех севооборотах и интенсивность баланса гумуса оценивается как «неудовлетворительная».

Наименьшая емкость баланса гумуса отмечена в севообороте «В» (888-943 кг) или на 15,3-24,1 % меньше чем в севообороте «А». Исключение из системы удобрений навоза, приводит к увеличению ёмкости баланса гумуса с 1107 до 1334 кг (или на 2,1-18,8 %) за счет выноса органического вещества со стоком и смывом и снижения процесса новообразования гумуса.

**Баланс основных элементов питания в зависимости от конструкции севооборотов, дозы внесения удобрений.** С 1990 г. по 2013 г. в севооборотах применяли органо-минеральную систему удобрений. Баланс азота в вариантах естественного плодородия складывался отрицательный во всех севооборотах (рис.18).



1990-2013 гг. Ф-0 – естественное плодородие; Ф-1 – КРС 5 т/га + N<sub>46</sub>; Ф-2 – КРС 8 т/га + N<sub>84</sub>.



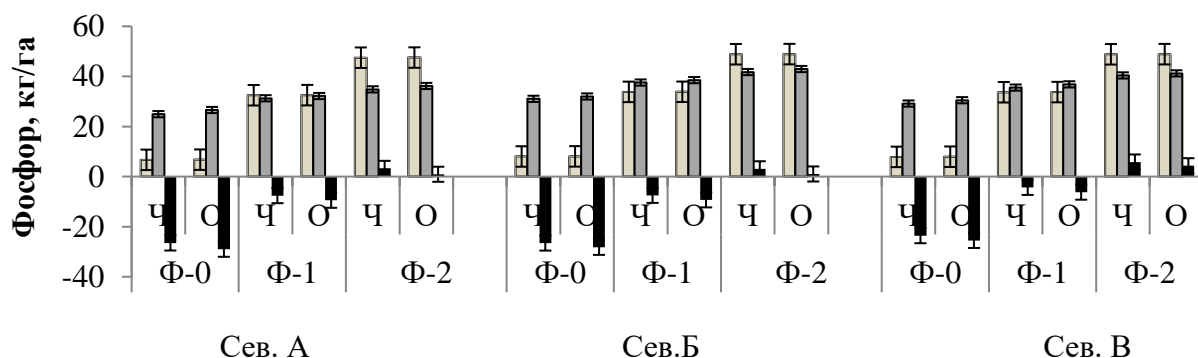
2014-2022 гг. Ф-0 – естественное плодородие; Ф-1 – N<sub>46</sub>; Ф-2 – N<sub>84</sub>.

Рисунок 18 – Баланс азота в севооборотах различной конструкции и уровнях минерального питания, кг/га. Примечание: Ч – чизельная обработка почвы, О – отвальная обработка почвы.

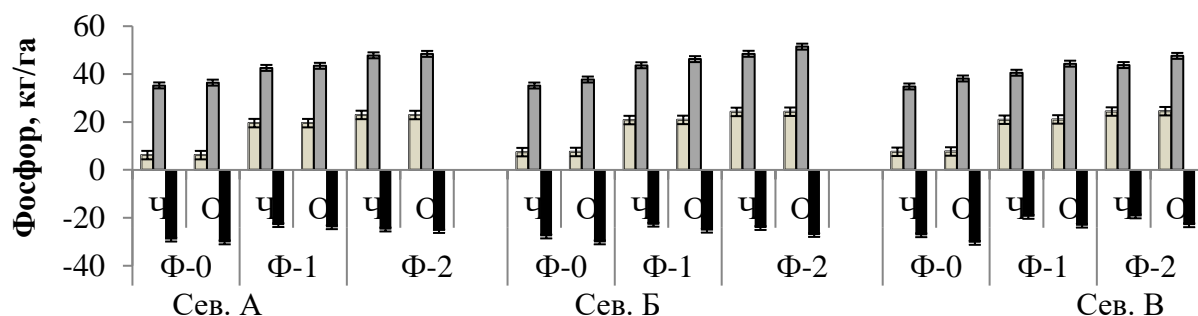
В результате внесения средних доз удобрений в севообороты «А» и «Б» баланс азота оставался отрицательным (-16-(-19 кг/га)). В севообороте «В» с 40 % многолетних трав количество поступившего азота и вынесенного с урожаем и стоком и смывом было равным. Увеличение дозы внесения навоза и азотных удобрений в полтора раза позволило получить положительный баланс азота (6-29 кг/га) с преимуществом в севообороте «В». В этом севообороте сказывалась почвозащитная роль удвоенного по площади поля многолетних трав и азотфиксирующая способность бобового компонента.

Применение только минеральных удобрений в различных дозах привело к отрицательному балансу азота (-25-(-66 кг/га)) с преимуществом в севообороте «А». В этом севообороте с долей чистого пара 20 % процессы денитрификации преобладают над процессами гумификации, а также имеют место наибольшие потери гумуса со стоком и смывом.

Расчет баланса элементов питания показал, что вынос фосфора не компенсировался приходной частью (-23– -29 кг/га, естественное плодородие), но существенно снижал их дефицит при внесении средних доз удобрений (-9 кг/га) во всех севооборотах. Внесение повышенных доз удобрений позволило получить положительный баланс фосфора во всех севооборотах (3-6 кг/га) с преимуществом в севообороте «В» (рис. 19).



1990-2005 гг. Ф-0 – естественное плодородие; Ф-1 – КРС 5 т/га + P<sub>30</sub>; Ф-2 – КРС 8 т/га + P<sub>48</sub>.



2006-2019 гг. Ф-0 – естественное плодородие; Ф-1 – P<sub>24</sub>; Ф-2 – P<sub>30</sub>

Рисунок 19 – Баланс фосфора в севооборотах различной конструкции и уровнях минерального питания, кг/га. Примечание: Ч – чизельная обработка почвы, О – отвальная обработка почвы.

С 2006 года были уменьшены на 30 % дозы фосфорных удобрений, и это значительно отразилось на балансе фосфора, во всех севооборотах он был отрицательным (-19-(-30 кг/га)). Восстановление дозы внесения фосфорных удобрений до первоначальных значений сократило разрыв в балансе фосфора, но он оставался отрицательным (-15 кг/га).

Баланс калия имеет отрицательные значения. Наибольшие его потери были в севообороте «А», имеющем в структуре пятипольного севооборота поле чистого пара, наиболее подверженное процессам деградации, и подсолнечник – культуру, выносящую калий в 2–3 раза больше, чем остальные изучаемые культуры.

С навозом, в среднем, калия поступало от 22,6 до 36 кг/га за ротацию севооборота. В севообороте «А» баланс калия изменялся от -122 кг/га до -155 кг/га, в севообороте «Б» потери калия со стоком и смывом и в результате выноса культурами были несколько меньше (-110) кг/га, чем в севообороте «А» (7,9-9,7 %). В севообороте «В», в структуре посевов которого пропашной культурой была кукуруза, потери калия (-94 кг/га) были на 19,6-27,3 % меньше, чем в севообороте «А» (рис. 20).

Для бездефицитного баланса всех элементов питания необходимо увеличить дозу внесения азотных удобрений на 27-33 %, фосфорных – на 40-45 %, калийных – на 42-56 %.

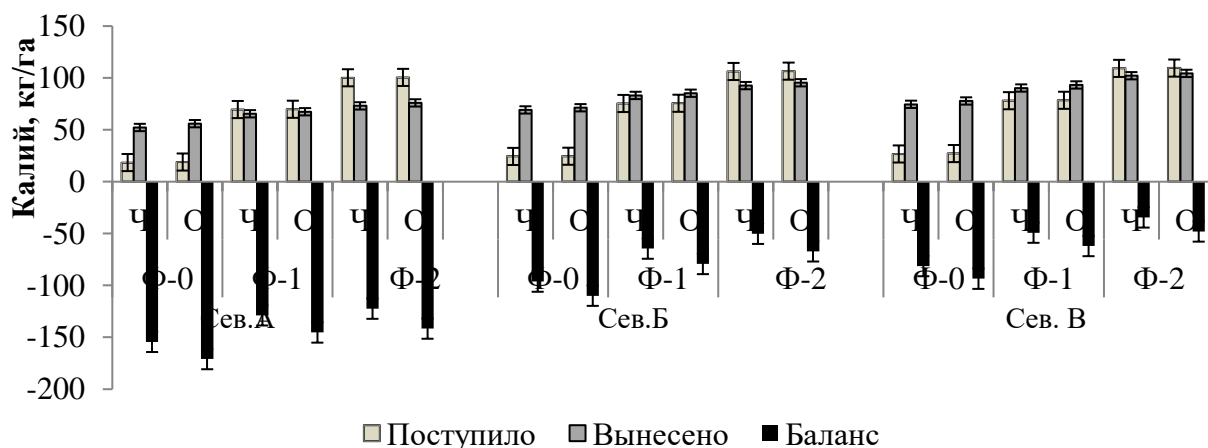


Рисунок 20 – Баланс калия в севооборотах различной конструкции в зависимости от уровней минерального питания и приемов обработки почвы, кг/га, 1990-2005 гг. Примечание: «Ф-0» – естественное плодородие; «Ф-1» – навоз КРС 5 т + N<sub>46</sub>P<sub>30</sub>K<sub>30</sub>; «Ф-2» – навоз КРС 8 т + N<sub>84</sub>P<sub>48</sub>K<sub>48</sub>; Ч – чизельная обработка почвы, О – отвальная обработка почвы.

**Баланс основных элементов питания в зависимости от агротехнологии возделывания сельскохозяйственных культур.** Применение чизельной обработки почвы сократило потери в севообороте «А» азота на 1,1-2,0 %; фосфора на 2,4-3,8 % и калия на 11,1-10,7 %; в севообороте «Б» – на 4,6-6,5 %; 8,1-10,7 % и 17,9-20,3 %, а в севообороте «В» – на 7,6-16,0 %; 10,5-15,9 % и 18,3-22,8 %, соответственно.

**Состояния баланса основных элементов питания в зависимости от конструкции севооборота, удобрений и агротехнологии возделывания сельскохозяйственных культур.** Оценить степень интенсивности той или иной системы

земледелия можно используя показатель – емкость баланса, а степень вовлечения питательных веществ – интенсивность. Расчет интенсивности баланса показал возможность устранения дефицита элементов питания за счет внесения органоминеральных удобрений, сохранения и повышения плодородия в севооборотах – при внесении повышенных доз удобрений (навоз КРС 8 т/га + N<sub>84</sub>P<sub>48</sub>K<sub>48</sub>). Наибольший объем вовлеченных в оборот элементов питания, характеризуемый емкостью баланса, был отмечен в севооборотах с 20 и 40 % многолетних трав.

### 9. Закономерности формирования продуктивности сельскохозяйственных культур в длительном опыте на черноземах обыкновенных среднеэродированных

*Урожайность сельскохозяйственных культур* приведена в таблице 4.

Оценить степень плодородия почвы можно по количеству и качеству получаемой сельскохозяйственной продукции. Внесение удобрений в средних дозах увеличило урожайность колосовых культур на 13-40 %, зернобобовых – на 26 %, подсолнечника – на 22-26 %, кукурузы на силос – 18-23 %, кукурузы на зерно – 13-19 %, многолетних трав – 12-15 %.

Таблица 4 – Урожайность культур севооборотов в зависимости от предшественника, уровня применяя удобрений и приемов обработки почвы, т/га, 1990–2022 гг.

Культура	Фон	Севооборот / Приемы обработки почвы						НСР <sub>05</sub>
		А		Б		В		
		Отв.	Чиз.	Отв.	Чиз.	Отв.	Чиз.	
Озимая пшеница по предшественнику чистый пар	0	4,48	4,37					0,49–0,45
	1	5,05	5,02					
	2	5,52	5,47					
Озимая пшеница по непаровым предшественникам	0	2,65	2,51	3,63	3,70	3,14	3,01	0,49–0,45
	1	3,63	3,52	4,35	4,50	3,97	3,82	
	2	4,19	4,12	4,84	5,00	4,46	4,46	
Яровой ячмень	0	2,60	2,57	2,73	2,73	2,54	2,51	0,39–0,55
	1	3,34	3,33	3,42	3,36	3,24	3,22	
	2	3,71	3,69	3,82	3,78	3,58	3,57	
Горох	0			1,76	1,72			0,14–0,31
	1			2,22	2,17			
	2			2,43	2,37			
Кукуруза на силос	0	21,5	20,2	20,8	20,7	21,1	20,3	1,59–2,90
	1	25,3	24,7	25,5	24,9	25,6	24,6	
	2	29,0	28,2	29,6	28,5	29,0	28,3	
Кукуруза на зерно	0					2,38	2,25	0,28–0,49
	1					2,69	2,67	
	2					3,24	3,25	
Подсолнечник	0	1,40	1,44	1,46	1,48			0,08–0,1
	1	1,76	1,79	1,82	1,81			
	2	2,05	2,09	2,12	2,16			
Многолетние травы	0			5,07	4,82	4,81	4,54	0,37–0,73
	1			5,68	5,46	5,41	5,23	
	2			6,26	5,97	6,02	5,77	

Увеличение дозы внесенных удобрений в полтора раза увеличило урожайность колосовых культур на 23-64 %, зернобобовых – 38 %, подсолнечника – 45-46 %, кукурузы на силос – 35-42 %, кукурузы на зерно – 36-44 %, многолетних трав – 23-27 % ( $p < 0,05$ ).

Для получения в Северном Приазовье высококачественного зерна, соответствующего требованиям, предъявляемым к «сильным» пшеницам, необходимо размещать озимую пшеницу в севооборотах по чистому пару даже при сравнительно невысоких дозах удобрений, а после непаровых предшественников – только при применении повышенных доз удобрений. Наилучшими предшественниками для получения зерна с высоким содержанием клейковины является чистый пар (30,4-30,6 %) и горох – (30,3-30,4 %).

Более высокая эффективность удобрений, внесенных под озимую пшеницу, была получена на среднем уровне применения удобрений по предшественнику озимая пшеница (9,82 кг/кг д.в.), а наименьшая – по предшественнику чистый пар (5,76 кг/кг д.в.). Эффективность удобрений в зависимости от предшественника располагалась в следующем ряду предшественников: озимая пшеница → кукуруза → зернобобовые → чистый пар.

Наибольшая эффективность удобрений была получена при внесении средних доз удобрений под яровой ячмень – 6,29-7,66 кг/кг д.в., под горох – 4,53-4,59 кг/кг д.в. Наибольшая эффективность удобрений под кукурузу на силос и зерно, подсолнечник отмечена при внесении повышенных доз удобрений была выше и составляла 46,5-54,4 кг/кг д.в., 5,3-6,2 кг/кг д.в., 4,0-4,2 кг/кг д.в.. Приемы обработки почвы и конструкция севооборота на урожайность существенного влияния не оказывают ( $p > 0,05$ ).

**Сравнительная продуктивность севооборотов.** Одним из важнейших принципов формирования структуры посевных площадей является создание севооборотов, объединяющих почвозащитные свойства и высокую продуктивность. Для этого необходимо сохранение почвенного плодородия за счет расширения в севообороте доли бобовых культур и многолетних трав (таблица 5).

Таблица 5 – Продуктивность севооборотов в зависимости от их конструкции, применения удобрений и агротехнологии возделывания, т/га зерн. ед., 1990-2022 гг.

Севооборот	Обработка почвы	Уровень применения удобрений		
		0	1	2
А	Чзельная	2,75	3,44	3,87
	Отвальная	2,83	3,48	3,91
Б	Чзельная	3,12	3,78	4,23
	Отвальная	3,16	3,84	4,29
В	Чзельная	2,91	3,54	4,00
	Отвальная	3,03	3,64	4,08

НСР<sub>05</sub> – предшественника в севообороте – 0,11–0,34 т/га; уровня применения удобрений – 0,14–0,33 т/га; приемы обработки почвы – 0,15–0,24 т/га.

Наиболее высокая продуктивность была отмечена в севообороте «Б» с 20 % многолетних трав. Его можно отметить, как севооборот, имеющий сбалансированную структуру посевов (3,12-4,29 т/га зерн. ед.). Внесение удобрений в средних и повышенных дозах увеличивало продуктивность севооборотов в среднем на 22,0 и

37,0 %. Доля участия факторов в общей изменчивости урожайности культур увеличивалась в ряду: приемы обработки почвы (0,6–9,4 %) → предшественник в севообороте (1,14–34,6 %) → уровень применения удобрений (42,9–78,1 %).

**Выявление взаимосвязей между параметрами почвенного плодородия чернозёмов обыкновенных и продуктивностью озимой пшеницы на основе метода главных компонент.** Для управления продуктивностью сельскохозяйственных культур, необходимо выявить наиболее значимые агрофизические и агрохимические показатели почвы. Поэтому мы использовали анализ главных компонент (РСА), позволяющий выделить главные компоненты, вносящие наибольший вклад в общую дисперсию. Первый фактор (ГК1) объясняет третью часть (30,0 %) общей дисперсии, второй фактор – 24,7 %, третий и четвертый – 15,1 и 13,4 %, а все четыре фактора объясняют 83,1 % всех взаимодействий.

Первый фактор или ГК1 был определен как «агрофизические показатели», и включал большинство агрегатов различных размеров при просеивании на воздухе и в воде, а также показатель влажности почвы в слое 0-30 см. Он объединяет в себе наиболее значимые параметры для формирования урожая, это – сохранение продуктивной влаги при посеве (-0,80), создание оптимальной почвенной структуры (7-2 мм – 0,66-0,87; >10 мм – (-0,71); <0,25, мм – (-0,76)) и наличие в почве питательных веществ ( $N_{\text{общ.}}$  (0,71);  $N-NO_3$  (-0,59) и  $N-NH_4$  (-0,82)), необходимых для стартового роста растений. Была статистически доказана общая закономерность: с увеличением вклада мезоагрегатов уменьшается количество крупно глыбистой и пылевидной фракций.

Вторая ГК отражает связь между агрофизическими и агрохимическими свойствами почвы. Они характеризуют почвенную структуру и содержание в почве основных элементов питания – фосфора (-0,74) и калия (-0,52), органического вещества (-0,61), участвующего в образовании почвенных агрегатов, обменных форм  $Ca^{+2}$  (0,59);  $Mg^{+2}$  (-0,73) и  $pH_{\text{сол}}$  (0,68), поддерживающих водно-солевой баланс почвенного раствора. Также в ГК2 наибольшие факторные нагрузки по модулю имеют такие показатели, как сток (0,71) и водопрочные агрегаты размером > 7 мм (0,53), 3-5 мм (0,78), 2-3 мм (0,63) и >0,25 мм (-0,89).

Третья ГК объединяет показатели, влияющие на смыв почвы (-0,83) и запас воды в снеге (0,77), водопроницаемость (0,72) и гребнистость почвы (-0,70). Все эти показатели характеризуют процессы, происходящие при смыве почвы.

Последний фактор – ГК4 – включает показатели плотность почвы (0,81) и количество мезоагрегатов, выделенных при «сухом» просеивании, размером 7-10 мм (0,61), 0,5–1 мм (-0,83) и 0,25-0,5 мм (-0,63). Плотность почвы имеет оптимальные значения непосредственно после обработки, а мезоагрегаты участвуют в образовании структуры почвы, капиллярного пространства и пористости почвы (рис. 21).

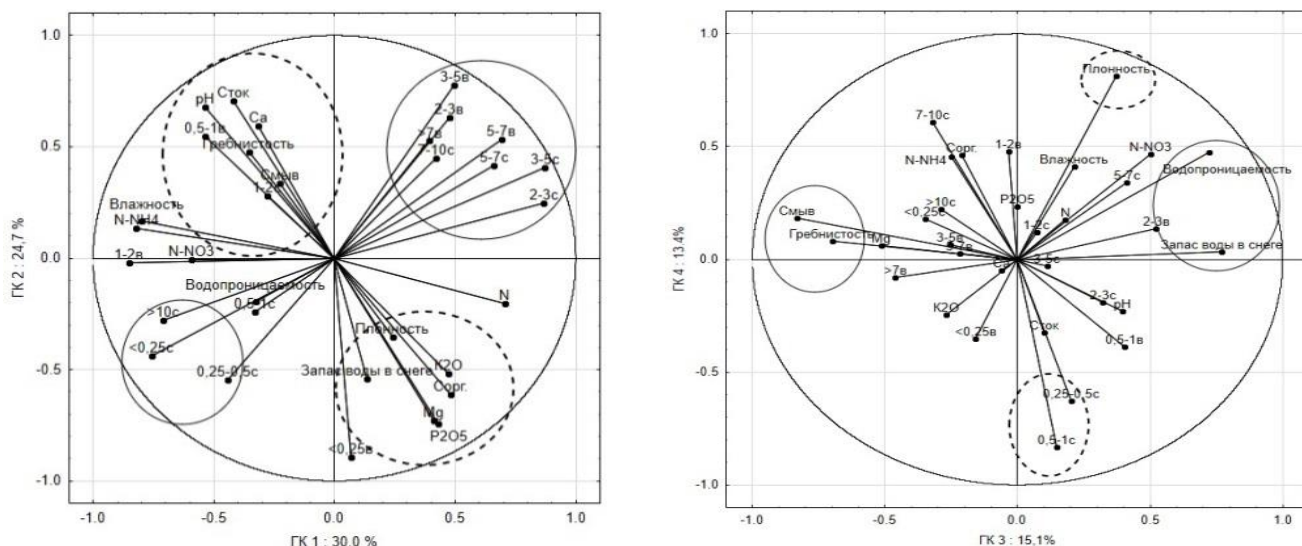


Рисунок 21 – Факторные нагрузки главных компонент основных агрохимических и агрофизических показателей чернозема обыкновенного в чистом пару и под озимой пшеницей.

**Прогноз урожайности озимой пшеницы.** На основании анализа главных компонент были выделены основные агрофизические и агрохимические показатели для составления модели параметров почвенного плодородия, позволяющие рассчитать урожайность озимой пшеницы. Отобраны девять основных показателей плодородия чернозема обыкновенного, с которыми были выявлены наибольшие корреляционные отношения.

Установлены значения показателей, при которых средняя урожайность озимой пшеницы на черноземе обыкновенном среднеэродированном составит 4,7 т/га. Представленные значения можно считать оптимальными для получения урожая озимой пшеницы в пределах от 3,32 т/га до 5,80 т/га (рис. 22).

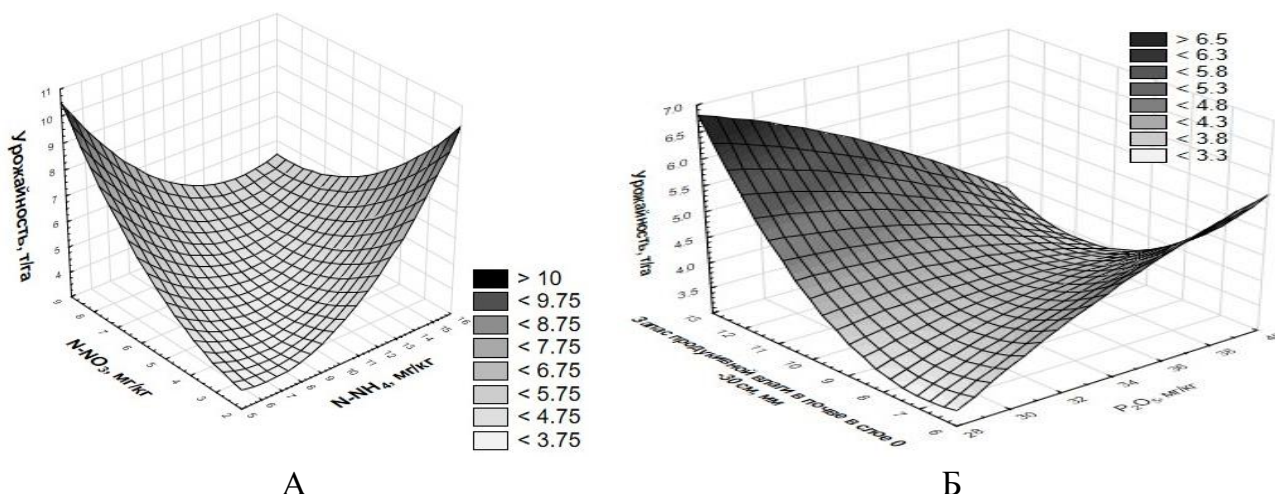


Рисунок 22 – Зависимость урожайности озимой пшеницы от агрохимических показателей почвы (А – содержание нитратного и аммонийного азота, Б – влажность почвы и содержание подвижного фосфора), 2020-2022 гг.

Выявлена тесная зависимость урожайности озимой пшеницы от влажности почвы ( $r = 0,76$ ), содержания нитратного ( $r = 0,86$ ) и аммонийного ( $r = 0,75$ ) азота и слабая – от структурности почвы ( $r = 0,18$ ), содержания подвижного фосфора ( $r = 0,27$ ), обменного калия ( $r = 0,08$ ), величины стока ( $r = 0,29$ ) и смыва ( $r = 0,18$ ), гумуса ( $r = 0,03$ ).

Эта зависимость описывается уравнением множественной регрессии, позволяющим рассчитать урожайность озимой пшеницы в зависимости от параметров почвенного плодородия чернозема обыкновенного среднеэродированного в изученных пределах:

$$Y=0,02(W)-0,001(NO_3)+0,18(NH_4)-0,04(P_2O_5)+0,0015(K_2O)-0,04(St)+0,016(Sm)+0,0038(Ag)-0,63(C)+2,60; (R^2=0,98)$$

Это наглядно отражают многомерные модели зависимости урожайности от агрохимических факторов плодородия почвы. Выявлена прямая зависимость урожайности озимой пшеницы от азотного режима почвы, влажности и фосфатного режима почвы. При содержании в почве минерального азота свыше 25 мг/кг, возможно, получить урожайность озимой пшеницы более 10 т/га. Выявлено большее влияние на урожайность озимой пшеницы влажности почвы, чем содержания подвижного фосфора, что подтверждает положение о достаточной обеспеченности чернозема обыкновенного фосфором.

#### **10. Эколого-экономическая и биоэнергетическая оценка приемов повышения плодородия почвы и продуктивности севооборотов различных конструкций, размещенных на эрозионно-опасных склонах**

*Эколого-экономическая оценка приемов повышения плодородия.* Оценить эффективность почвозащитных приемов повышения плодородия возможно с использованием методики эколого-экономической оценки. Наиболее высокий эколого-экономический эффект был получен в севообороте «Б» с 20 % многолетних трав, выраженный в экономии средств, используемых на восстановление почвенного плодородия на 22,1 %, возросшей рентабельности производства – 148-154 %, условно чистого дохода – 45,2-51,3 тыс. руб./га и окупаемости затрат произведенной продукцией – 2,48-2,54 руб./руб (табл. 6).

*Биоэнергетическая оценка приемов повышения плодородия* выявила, что наименьшие затраты на производство продукции имели место в севообороте «Б» (9,8-15,3 ГДж/га), а энергетическая эффективность была наиболее высокая (4,7-5,5 ГДж/га). Энергетическая эффективность севооборота «Б» выше, чем севооборота «А» на 57,5-70,7 % и выше, чем севооборота «В» на 25,0-31,2 %. Внесение удобрений в средних и повышенных дозах, увеличивает энергию, накопленную в урожае на 8,6-10,7 % и 20,5-25,9 %, а также способствует сохранению плодородия почвы. Почвозащитная обработка позволяла экономить энергию, затраченную на производство продукции до 4,8 % и до 9,7 %. Использование чизельной обработки почвы, как ресурсосберегающей и почвозащитной, сокращающей процессы эрозии, увеличивает коэффициент энергетической эффективности на 3,4-11,1 %.

Таблица 6 – Эколого-экономическая эффективность севооборотов различной конструкции в зависимости от уровня применения удобрений на эрозионно-опасных склонах, 1990-2022 гг.

Показатель	Уровень применения удобрений	Севооборот					
		А		Б		В	
		Отв.	Чиз.	Отв.	Чиз.	Отв.	Чиз.
Производственные затраты, тыс. руб./га	0	25,2	23,8	24,7	23,3	24,2	22,9
	1	27,4	25,0	26,6	24,3	25,8	23,5
	2	29,7	27,3	28,8	26,5	27,9	25,7
Затраты на возмещение ущерба от эрозии, тыс. руб./га	0	11,2	9,7	7,3	5,7	5,4	4,2
	1	12,1	10,6	8,0	6,2	5,9	4,5
	2	13,4	11,6	8,7	6,8	6,4	5,0
Всего затрат, тыс. руб./га	0	36,4	33,5	32,0	29,0	29,6	27,0
	1	39,5	35,6	34,6	30,5	31,6	28,1
	2	43,1	38,9	37,5	33,3	34,3	30,6
Продуктивность, т зерн. ед./га	0	2,83	2,75	3,16	3,12	3,03	2,91
	1	3,48	3,44	3,84	3,78	3,64	3,54
	2	3,91	3,87	4,29	4,23	4,08	4,00
Стоимость произведенной продукции, тыс. руб.	0	56,5	55,0	63,2	62,3	60,6	58,2
	1	69,6	68,9	76,7	75,7	72,8	70,7
	2	78,2	77,5	85,9	84,6	81,6	80,1
Условный чистый доход, тыс. руб./га	0	20,1	21,5	31,2	33,3	31,0	31,2
	1	30,2	33,3	42,2	45,2	41,2	42,7
	2	35,2	38,5	48,3	51,3	47,2	49,4
Рентабельность, %	0	55,3	64,1	97,3	114,6	104,8	115,5
	1	76,4	93,6	122,1	148,4	130,2	152,1
	2	81,6	99,0	128,7	154,1	137,5	161,4

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На склоне крутизной  $3,5-4^\circ$  выявлена тесная зависимость ( $R^2=0,78-0,89$ ) между стоком талых и ливневых вод и смывом почвы. При увеличении стока воды на 1 мм увеличивается смыв почвы на 0,11-0,27 т/га. Контурно-полосная организация территории склона, в зависимости от доли многолетних трав в севообороте, позволяет сократить сток талой и ливневой воды на 33,9-56,3 %, смыв почвы на 35,0-52,5 %. Применение почвозащитной (чизельной) обработки сокращает сток воды на 20,0-23,9 %, смыв – на 13,0-20,6 %. Долгосрочный прогноз с использованием автоматизированной нейронной сети при сохранении существующих условий, выявил общую тенденцию затухания процессов эрозии на склонах означенной крутизны с различной степенью интенсивности, в зависимости от конструкции почвозащитных севооборотов и приемов обработки почвы.

2. Ретроспективный анализ структурного состояния чернозема обыкновенного выявил уменьшение в результате длительного землепользования содержания доли глыбистых агрегатов за счет увеличения вклада пылеватой фракции. Применение чизельной обработки почвы ведет к увеличению доли крупно-глыбистых агрегатов на 10,2-21,7 % и мезоагрегатов (0,25-7 мм) на 3,0-21,3 %, а также росту  $K_{стр.}$  и СВД, по сравнению с отвальной вспашкой. В результате использования анализа главных компонент были выявлены структурные отдельности, вносящие наибольший вклад в почвообразовательный процесс. Определены закономерности распределения структурных отдельностей агрочерноземов, влияющих на водоустойчивые свойства и приводящие к процессам деградации. При разрушении крупно-глыбистых агрегатов ( $>10$  и 7-10 мм) увеличивается доля фракций мелкого размера (0,5-1,0 мм и 0,25–0,5 мм).

3. Сток талой воды имеет тесную зависимость с высотой снегового покрова и запасом воды в снеге. Высота снегового покрова увеличивается по мере снижения интенсивности основной обработки. Сток ливневой воды определяется водопроницаемостью черноземов обыкновенных и зависит от предшественника, приемов обработки почвы и сроков ее определения. Выявлена обратная зависимость инфильтрации от плотности сложения и влажности почвы ( $r = -0,6-0,9$ ), прямая – от количества водоустойчивых агрегатов ( $r = 0,7-0,9$ ). Полученные уравнения могут быть использованы при проектировании систем земледелия на ландшафтной основе и организации мелиоративных мероприятий. Чередование в полосах культур, устойчивых к процессам эрозии с неустойчивыми, уменьшает вероятность стока воды и смыва почвы.

4. Эрозионная устойчивость склона определяется способностью аккумулировать осадки холодного периода и уменьшается в ряду: чистый пар → непаровые предшественники озимой пшеницы → озимая пшеница по пару. Влияет на эрозионную устойчивость склона корневая система сельскохозяйственных культур, что обусловлено активной деятельностью её усваивающей части. Корневая система служит биологическим армирующим фактором для почвенных частиц: органические и минеральные выделения корней, а затем продукты их минерализации и гумификации, способны пополнять почву органическими веществами и служить клеящим материалом для почвенных агрегатов.

5. Наибольшее количество азота поступает в почву из растительных остатков многолетних трав и колосовых культур. На азотный режим чернозема обыкновенного в большей степени влияли температурный режим и влажность почвы, чем предшественник и приемы обработки почвы. Внесение органоминеральных удобрений в повышенных дозах поддерживает положительный баланс азота.

6. Анализ содержания гумуса в длительном опыте в результате возделывания культур по экстенсивной системе выявил уменьшение этого показателя на 0,11-0,25 %. Сокращение процессов деградации за счет введения 20 % многолетних трав в структуру севооборота и внесения повышенных доз органоминеральных удобрений способствует бездефицитному воспроизводству плодородия почвы. Увеличение доли многолетних трав до 40 % при этой же дозе удобрений приводит к расширенному воспроизводству гумуса. Исключение навоза из системы удобрений сопровождается тенденцией к снижению содержания гумуса и отрицательному балансу азота. Приемы обработки почвы существенного влияния на изменение содержания гумуса не оказывал. Содержание гумуса в почвенных агрегатах различного размера изменялось незначительно ( $3,58-3,65 \pm 0,04$  %).

7. Прогноз динамики гумуса, составленный с использованием автоматизированных нейронных сетей, подтверждает тенденцию потери гумуса без внесения удобрений в последующие сто лет. Использование почвозащитной обработки сокращает потери гумуса на 6,2-32,0 % (относительных), за счет снижения процессов деградации. Интенсивность баланса гумуса увеличивается по мере роста доли многолетних трав и доз внесения удобрений. Исключение из системы удобрений навоза приводит во всех севооборотах к снижению интенсивности баланса гумуса, которая оценивается в таких условиях, как «неудовлетворительная».

8. Содержание подвижного фосфора в почве на естественном уровне питания за семь ротаций севооборотов снизилось на 10,1-24,1 %, по сравнению с исходным его содержанием, а обеспеченность фосфором упала до низкого уровня. Систематическое внесение фосфорных удобрений в средних дозах позволило повысить содержание подвижного фосфора в почве до уровня средней обеспеченности, а в повышенных – до высокой обеспеченности. Уменьшение дозы внесения фосфорных удобрений на 30 % и исключение органических удобрений привело к отрицательному балансу фосфора. Составленный прогноз с использованием нейронных сетей подтверждает общую тенденцию снижения содержания подвижного фосфора без внесения минеральных удобрений. В почвозащитных севооборотах с долей многолетних трав 20-40 % отмечается увеличение содержания подвижного фосфора в 2-3 раза, по сравнению с исходным количеством.

9. Длительное использование эродированных земель без внесения удобрений привело к уменьшению содержания обменного калия до 35 %, по сравнению с исходными значениями. Систематическое внесение калийных удобрений в средних дозах приводит к незначительному снижению содержания калия, а повышенные дозы удобрений незначительно увеличивают его содержание. Изучение содержания калия при внесении удобрений в различных дозах выявили отрицательную направленность баланса.

Нейросетевой прогноз содержания обменного калия при внесении средних доз удобрений выявил некоторое снижение, по сравнению с текущими значениями, а внесение повышенных доз удобрений поддерживает содержание обменного калия на уровне текущего года. Для бездефицитного баланса всех элементов питания в черноземе обыкновенном среднеэродированном необходимо увеличить дозу внесения азотных удобрений на 27–33 %, фосфорных – на 40-45 %, калийных – на 42-56 %.

10. Урожайность озимой пшеницы по различным предшественникам изменялась от 2,51 до 5,52 т/га, ярового ячменя от 2,51 до 3,82 т/га, гороха от 1,72 до 2,43 т/га, кукурузы на силос от 20,8 до 29,6 т/га, кукурузы на зерно – 2,25-3,25 т/га; подсолнечника – 1,40-2,16 т/га, сена многолетних трав – в пределах 4,54-5,41 т/га. Большее влияние на урожайность оказывал уровень почвенного плодородия, чем предшественник и приемы обработки почвы. Наибольшая окупаемость удобрений была получена при внесении средних доз. Эффективность удобрений в зависимости от предшественника озимой пшеницы располагалась в ряду: озимая пшеница → кукуруза → зернобобовые → чистый пар. Наилучшими предшественниками для получения зерна с высоким содержанием клейковины является чистый пар (30,6 %) и зернобобовые (30,4 %).

11. Результаты многолетних исследований позволили разработать научные основы и параметры построения севооборотов в условиях средней эрозионной опасности. Наиболее высокая продуктивность отмечена в зерно-травяно-пропашном севообороте с долей многолетних трав 20 % (3,12-4,29 т/га зерн. ед.). Внесение удобрений в средних и повышенных дозах увеличивало продуктивность севооборотов в среднем на 22,0 и 37,0 %.

12. На основании анализа главных компонент были выделены девять интегральных факторов, оказывающих наибольшее влияние на урожайность озимой пшеницы. С учетом вклада выделенных факторов построена модель параметров почвенного плодородия для чернозема обыкновенного. Анализ агрофизических и агрохимических показателей черноземов обыкновенных в пространстве главных компонент (ГК) позволил выделить четыре ГК, характеризующие обратную зависимость агрофизических показателей и влажности почвы, взаимосвязь агрофизических и агрохимических свойств, связь между смывом почвы и гребнистостью поверхности, запасов воды в снеге с водопроницаемостью, зависимость плотности почвы и доли агрегатов размером 0,25-7 мм.

13. Наиболее высокая биоэнергетическая оценка и эколого-экономический эффект были получены в севообороте с долей многолетних трав 20 %, что обусловлено экономией средств, используемых на восстановление почвенного плодородия, рентабельностью производства (148-154 %) и окупаемостью затрат произведенной продукцией на 2,48-2,54 руб/руб.

## ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВУ

В результате многолетних исследований и разработки приёмов сохранения и воспроизводства плодородия чернозема обыкновенного среднеэродированного и повышения продуктивности севооборотов различной конструкции рекомендуется производству:

- для сокращения процессов эрозии на склонах крутизной 3,5-4,0° до безопасных пределов рекомендуется в качестве основной обработки почвы применять почвозащитную – чизельную обработку в системе контурно-ландшафтной организации территории с полосным размещением культур и зерно-травяно-пропашные севообороты с 20-40 % многолетних трав;

- для получения урожайности сельскохозяйственных культур 3,7-3,8 т/га зерн. ед. и сохранения плодородия чернозема обыкновенного вносить удобрения в дозе 5 т навоза и  $N_{46}P_{30}K_{30}$ , использовать зерно-травяно-пропашной севооборот с 20 % многолетних трав как севооборот, имеющий сбалансированную структуру посевов;

- при отсутствии навоза увеличить внесение минеральных удобрений до  $N_{84}P_{48}K_{48}$  и долю многолетних трав до 40 %.

Систематически проводить мониторинг содержания гумуса и основных элементов питания для составления прогноза их изменения, уточнения эффективности систем обработки почвы и корректировки систем удобрений. Для более точной оценки состояния плодородия использовать почвенную диагностику, балансовый метод и нейросетевой прогноз.

## СПИСОК ТЕРМИНОВ

MLP – многослойный перцептрон;

PСА – Principal Component Analysis;

АНС – автоматизированные нейронные сети;

ГК – главные компоненты;

$K_{вдпр}$  – коэффициент водопропускности;

$K_{стр}$  – коэффициент структурности;

СВД – средневзвешенный диаметр агрегатов.

**Список научных публикаций, в которых изложены основные научные  
результаты диссертации**

**Статьи, опубликованные в журналах, входящих в Перечень рецензируемых  
научных изданий ВАК по специальности 1.5.19. Почвоведение  
(биологические науки)**

1. **Гаевая, Э. А.** Прогнозирование урожайности озимой пшеницы на основе агрофизических и агрохимических свойств чернозема обыкновенного приазовской зоны ростовской области / Э. А. Гаевая, О. С. Безуглова // *Вестник Дагестанского научного центра*. – 2025. – № 96. – С. 40-45. – DOI 10.31029/vestdnc96/6 (K2).
2. **Гаевая, Э. А.** Эффективность внесения удобрений под озимую пшеницу в степной зоне Ростовской области / Э. А. Гаевая, О. С. Безуглова // *Агрохимический вестник*. – 2025. – №2. – С. 23-26. – DOI 10.24412/1029-2551-2025-2-005. (K1, RSCI).
3. **Гаевая, Э. А.** Изменение структурно-агрегатного состава чернозема обыкновенного в длительном стационарном опыте / Э. А. Гаевая И. Н. Ильинская, С. А. Тарадин // *Агрофизика*. – 2022. – № 3. – С. 12-19. – DOI 10.25695/AGRPH.2022.03.02. (K1, RSCI)
4. **Gaevaya, E. A.** Use of analysis of the principal components to identify the relationships between soil aggregates and parameters of soil fertility of migration–segregation chernozems / E. A. Gaevaya, O. S. Bezuglova // *Moscow University Soil Science Bulletin*. – 2025. – Vol. 80, No. 2. – P. 228-238. – DOI 10.3103/S0147687425700103. (K1, RSCI)
5. Conditions for Occurrence of Meltwater Runoff from Common Black Soils / I.N. Pyinskaya, E. V. Polujektov, E. A. Gaevaya [et al.] // *Russian Agricultural Sciences*. – 2023. – Vol. 49, No. S3. – P. S446-S455. – DOI 10.3103/s1068367423090082. (K1, RSCI).
6. Влияние удобрений и гидротермических условий на урожайность кукурузы на силос в длительном опыте на черноземах обыкновенных Ростовской области / Э. А. Гаевая, И. Н. Ильинская, О. С. Безуглова [и др.] // *Проблемы агрохимии и экологии*. – 2022. – № 2. – С. 3-11. – DOI 10.26178/AE.2022.25.43.003 (K2)
7. Гаевая, Э. А. Нейросетевой прогноз содержания гумуса в черноземах обыкновенных слабоэродированных Ростовской области / Э. А. Гаевая, О. С. Безуглова // *АгроЭкоИнфо*. – 2025. – № 2(68). – DOI 10.51419/202152209. – Режим доступа: [http://agroecoinfo.ru/STATYI/2025/2/st\\_209.pdf](http://agroecoinfo.ru/STATYI/2025/2/st_209.pdf) (дата обращения 21.07.2025). (K3)
8. Безуглова, О. С. Прогноз содержания подвижного фосфора в агрочернозёмах Ростовской области с использованием автоматизированных нейронных сетей / О. С. Безуглова, Э. А. Гаевая // *АгроЭкоИнфо*. – 2025. – № 2(68). – DOI 10.51419/202152216. – Режим доступа: [http://agroecoinfo.ru/STATYI/2025/2/st\\_216.pdf](http://agroecoinfo.ru/STATYI/2025/2/st_216.pdf) (дата обращения 21.07.2025). (K3)
9. Изменение фосфорно-калийного режима черноземов обыкновенных в длительном опыте Ростовской области / Э. А. Гаевая, И. Н. Ильинская, О. С. Безуглова, Е. Н. Нежинская // *АгроЭкоИнфо*. – 2022. – № 2(50). – DOI 10.51419/202122202. – Режим доступа: [http://agroecoinfo.ru/STATYI/2022/2/st\\_202.pdf](http://agroecoinfo.ru/STATYI/2022/2/st_202.pdf) (дата обращения 21.07.2025). (K3)
10. Гаевая, Э. А. Применение метода главных компонент для выявления оптимальных параметров почвенного плодородия черноземов обыкновенных Ростовской области / Э. А. Гаевая // *Живые и биокосные системы*. – 2025. – № 51. – DOI 10.18522/2308-9709-2025-51-4. – Режим доступа: <https://jbks.ru/archive/issue-51/article-4> (дата обращения 21.07.2025). (K3)

### Статьи в научных изданиях, входящих в Scopus, Web of Science

11. **Influence** of Heat Stress and Water Availability on Productivity of Silage Maize (*Zea mays* L.) under Different Tillage and Fertilizer Management Practices in Rostov Region of Russia / E. A. Gaevaya, I. N. Iljinskaya, O. S. Bezuglova [et al.] // *Agronomy*. – 2023. – Vol. 13, No. 2. – P. 320. – DOI 10.3390/agronomy13020320. (K1, Scopus.)
12. Gaevaya, E. A. **Agrophysical** Properties of Ordinary Slightly Eroded Chernozem in a Long-Temp Experiment in Rostov Oblast / E. A. Gaevaya, O. S. Bezuglova, E. N. Nezhinskaya // *Eurasian Soil Science*. – 2022. – Vol. 55, No. 11. – P. 1399-1414. – DOI 10.1134/S1064229322110059. [Русскоязычная версия: Гаевая, Э. А. Агрофизические свойства чернозема обыкновенного слабоэродированного в длительном опыте в Ростовской области / Э. А. Гаевая, О. С. Безуглова, Е. Н. Нежинская // *Почвоведение*. – 2022. – № 11. – С. 1399-1414. – DOI 10.31857/S0032180X22110053]. (K1, Scopus.)
13. **Динамика** деградации земель в Ростовской области / О. С. Безуглова, И. Н. Ильинская, В. Е. Закруткин [и др.] // *Известия Российской академии наук. Серия географическая*. – 2022. – Т. 86, № 1. – С. 41-54. – DOI 10.31857/S2587556622010034. (K1, Scopus.)
14. Gaevaya, E. **The role** of soil-protective crop rotations, tillage and fertilizers in stabilizing erosion processes and the preservation of organic carbon on the slopes of the Rostov region (Russia) / E. Gaevaya, O. Bezuglova // *Soil and Environment*. – 2021. – Vol. 40, No. 2 – P. 110-118. – DOI 10.25252/SE/2021/202594. (K2, Scopus.)

### Монографии

15. Почвы Ростовской области: плодородие, деградация и восстановление в условиях аридизации климата : монография / Клименко А. И., Безуглова О. С., Гринько А. В. [и др.] ; под общей редакцией О. С. Безугловой ; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение "Федеральный Ростовский аграрный научный центр". – п. Рассвет: Полиграф-Сервис, 2024. – 232 с. – DOI 10.69535/FRARC.2024.87.93.001. – ISBN 978-5-6052711-1-6.
16. Агротехнические особенности возделывания подсолнечника в Ростовской области : монография / Н. Н. Вошедский, И. Н. Ильинская, В. А. Кулыгин [и др.] ; под общ. ред Н. Н. Вошедского, И. Н. Ильинской ; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение "Федеральный Ростовский аграрный научный центр" (ФГБНУ ФРАНЦ). - п. Рассвет: АзовПринт, 2024. – 127 с. – DOI 10.69535/FRARC.2024.47.39.001. – ISBN 978-5-6053497-1-6. – Режим доступа: <https://doi.org/10.69535/FRARC.2024.47.39.001> (дата обращения 21.07.2025)
17. Агробиологические особенности возделывания новых сортов гороха в Ростовской области: монография / [Н. Н. Вошедский, И. Н. Ильинская, Н. А. Коробова и др.]; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение "Федеральный Ростовский аграрный научный центр" (ФГБНУ ФРАНЦ). – Рассвет: АзовПринт, 2022. – 155 с. – ISBN 978-5-6048735-8-8.
18. Глобальный климат и почвенный покров России: проявления засухи, меры предупреждения, борьбы, ликвидация последствий и адаптационные мероприятия (сельское и лесное хозяйство): национальный доклад. Т. 3 / [А. Л. Иванов, И. М. Донник, В. А. Багиров и др.] ; под редакцией Р. С.-Х. Эдельгериева. – Москва: МБА, 2021. – 699 с. – DOI 10.52479/978-5-6045103-9-1. – ISBN 978-5-6045103-9-1.
19. Проблемы и перспективы развития агропромышленного производства:

монография (научное издание) / Л. Б. Винничек, А. И. Алтухов, Л. П. Силаева [и др.]; под научной редакцией доктора экономических наук, профессора Л. Б. Винничек, кандидата сельскохозяйственных наук, доцента А. А. Галиуллина; Министерство науки и высшего образования РФ, Министерство сельского хозяйства РФ, Пензенский государственный аграрный университет, Межотраслевой научно-информационный центр Пензенского государственного аграрного университета. – Пенза: РИО ПГАУ, 2019. – 239 с. – ISBN 978-5-907181-11-3.

#### **Патенты/свидетельства**

20. Патент № 2716576 С1 Российская Федерация, МПК А01G 7/00. Способ определения массы корневой системы пшениц : № 2018144830 : заявл. 17.12.2018 : опубл. 12.03.2020 / В. Е. Зинченко, **Э. А. Гаевая**, Е. Н. Нежинская [и др.]; патентообладатель Федеральное государственное бюджетное научное учреждение "Федеральный Ростовский аграрный научный центр" (ФГБНУ ФРАНЦ).

21. Патент на полезную модель № 119108 U1 Российская Федерация, МПК G01N 1/04. Устройство для отбора и фиксирования почвенных проб и корневой системы растения: № 2012110082/05: заявл. 15.03.2012 : опубл. 10.08.2012 / А. Е. Мищенко, **Э. А. Гаевая**, Н. Н. Кисс [и др.]; патентообладатель Государственное научное учреждение Донской зональный научно-исследовательский институт сельского хозяйства Российской академии сельскохозяйственных наук (ГНУ Донской НИИСХ Россельхозакадемии).

#### **Рекомендации производству**

22. Эколого-адаптивная технология возделывания сортов и гибридов подсолнечника для различных типов агроландшафтов Ростовской области / Н. Н. Вошедский, И. Н. Ильинская, О. А. Целуйко [и др.]; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный Ростовский аграрный научный центр» (ФГБНУ ФРАНЦ). – п. Рассвет: АзовПринт, 2023. – 63 с. – DOI 10.34924/FRARC.2023.80.76.002. – ISBN 978-5-60505356-9.

23. Эколого-адаптивная технология возделывания новых сортов озимой пшеницы для различных типов агроландшафтов Ростовской области: (рекомендации) / [Вошедский Н. Н., Ильинская И. Н., Целуйко О. А. и др.]; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение "Федеральный Ростовский аграрный научный центр" (ФГБНУ ФРАНЦ). – п. Рассвет: АзовПринт, 2022. – 67 с. – DOI 10.34924/FRARC.2022.62.94.003. – ISBN 978-5-6049320-0-1. – Режим доступа: <https://doi.org/10.34924/FRARC.2022.62.94.003> (дата обращения 21.07.2025)

24. Усовершенствованная эколого-адаптивная технология возделывания новых сортов гороха применительно к почвенно-климатическим условиям приазовской зоны Ростовской области в различных агроландшафтах : (рекомендации) / [Н.Н. Вошедский, И.Н. Ильинская, Э.А. Гаевая и др.; редкол.: Вошедский Н.Н., Ильинская И.Н.]; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение "Федеральный Ростовский аграрный научный центр" (ФГБНУ ФРАНЦ). – п. Рассвет: ФГБНУ ФРАНЦ, 2021. – 58 с. – DOI 10.34924/FRARC.2022.91.42.001. – ISBN 978-5-6047358-2-4. – Режим доступа: [http://www.xn--80ag4abjdei4b.xn--p1ai/files/vib/sort\\_gor.pdf](http://www.xn--80ag4abjdei4b.xn--p1ai/files/vib/sort_gor.pdf) (дата обращения 21.07.2025).