

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени М.В.ЛОМОНОСОВА

*На правах рукописи*

**Чекин Михаил Романович**

**Эколого-экономическая оценка деградации почв и земель региона  
с применением различных методических подходов  
(на примере Пензенской области)**

1.5.15 – Экология

1.5.11 – Микробиология

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата биологических наук

Москва – 2024

Диссертация подготовлена на кафедре эрозии и охраны почв факультета почвоведения МГУ имени М.В.Ломоносова

**Научные руководители**

**Макаров Олег Анатольевич** – доктор биологических наук, профессор

**Поздняков Лев Анатольевич** – кандидат биологических наук

**Официальные оппоненты**

**Сапожников Пётр Михайлович** – доктор сельскохозяйственных наук, кафедра физики и мелиорации почв факультета почвоведения ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова», ведущий научный сотрудник

**Курганова Ирина Николаевна** – доктор биологических наук, доцент, лаборатория почвенных циклов азота и углерода ФГБУН «Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН», главный научный сотрудник

**Васенев Вячеслав Иванович** – кандидат биологических наук, департамент ландшафтного проектирования и устойчивых экосистем аграрно-технологического института ФГАОУ ВО РУДН, доцент

Защита диссертации состоится «8» октября 2024 г. в 15 часов 00 минут на заседании диссертационного совета МГУ.015.3 Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова на факультете почвоведения по адресу: 119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, МГУ имени М.В.Ломоносова, факультет почвоведения, аудитория М-2.

Тел: 8(495)–939-24-67, электронная почта: [paramonovata@my.msu.ru](mailto:paramonovata@my.msu.ru)

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на портале: <https://dissovet.msu.ru/dissertation/2949>

Автореферат разослан «2» сентября 2024 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета,

кандидат биологических наук

Т. А. Парамонова

## **Актуальность проблемы**

На сегодняшний день в России наиболее актуальна проблема эффективного использования земель сельскохозяйственного назначения. Особенно важно это для аграрных регионов России, к числу которых относится Пензенская область. Согласно Государственному докладу о состоянии природных ресурсов Пензенской области (2020), более 60% сельскохозяйственных земель региона приходится на плодородные черноземные почвы. Одна из основных проблем земельных ресурсов области – их подверженность различным деградационным процессам (агроистощению, овражной эрозии и др.). При этом указанная деградация затрагивает не только природные, но и социально-экономические характеристики земель Пензенской области (низкие показатели урожайности и качества сельскохозяйственных культур, снижение уровня жизни, отток людей из сельской местности и т.д.). В этой связи эколого-экономическая оценка произошедших потерь от различных процессов деградации сельскохозяйственных земель, определение стоимости и сценария их восстановления является важнейшей научно-практической задачей.

Существующие концепции эколого-экономической оценки деградированных земель, в частности, – оценка ущерба/вреда от деградации почв и земель (Яковлев и др., 2016), определение индекса нейтрального баланса деградации земель (НБДЗ) (Kust et al., 2017), экономики деградации земель (von Braun et al., 2013) – не имеют непосредственной связи с вопросами устойчивого производства продуктов питания и нечасто применяются совместно для выработки стратегии устойчивого развития сельских территорий. В результате нерационального использования удобрений и малоэффективного землепользования почвы теряют свои продуктивные функции, о чем свидетельствуют не только химические и физические, но и биологические показатели (Krasilnikov et al., 2022).

С учетом всех вышеуказанных факторов проведение комплексной эколого-экономической оценки деградации почв и земель в Пензенской области становится неотъемлемой частью стратегического планирования развития региона. При этом, в комплекс методов эколого-экономической оценки деградации земель стали входить методы, применяемые в микробиологии почв (Ананьева и др. 2011; Кожевин, 2023) и позволяющие оценить состояние почвенного микробиоценоза.

**Цель настоящей работы:** провести эколого-экономическую оценку деградации почв и земель для различных иерархических уровней административно-хозяйственного устройства Пензенской области (регион – муниципальное образование – агрохозяйство) с применением различных методических подходов.

Поставленная цель определила следующие **задачи**:

1. Рассчитать величину ущерба от деградации почв и земель для 3-х изучаемых уровней административно-хозяйственного устройства Пензенской области.
2. Применить методологию нейтрального баланса деградации земель для изучаемого региона.
3. Оценить экономическую эффективность ведения хозяйственной деятельности при существующем и предполагаемых вариантах землепользования (применить методику фон Брауна) для 3-х изучаемых уровней административно-хозяйственного устройства Пензенской области.
4. Выявить взаимосвязь микробиологических показателей почвы и эколого-экономической оценки деградации земель.

#### **Научная новизна**

Проведённый впервые комплексный эколого-экономический и микробиологический анализ почв и земель позволил установить их деградацию на разных иерархических уровнях административно-хозяйственного устройства Пензенской области.

Было впервые показано, что значения азотфиксирующей активности и активной биомассы прокариот имеют выраженную взаимосвязь с показателями агроистощения почв агрохозяйств Пензенской области.

#### **Защищаемые положения**

1. Деграционные процессы в почвах и на землях на разных иерархических уровнях административно-хозяйственного устройства Пензенской области (регион в целом – муниципальный район – агрохозяйство) протекают неоднородно: с разной интенсивностью и направленностью. Поэтому инвестиции в восстановление продуктивности земель для области в целом не оправданы, а для района и агрохозяйства - оправданы (горизонт планирования инвестиций составлял 20 лет).
2. Адаптация методики нейтрального баланса деградации земель путём

добавления к базовым индикаторам показателей: содержание органического вещества, обменного калия, подвижного фосфора и кислотности в пахотных почвах – приводит к существенному росту расчетной величины – доли деградированных земель на всех исследованных иерархических уровнях административно-хозяйственного устройства Пензенской области.

3. Микробиологическая индикация агроистощения чернозема выщелоченного показала связь удельной азотфиксирующей активности и активной микробной биомассы прокариот со степенью деградации. По мере увеличения степени деградации почв удельная азотфиксация закономерно падает, а изменения активной биомассы имеют «волнообразный» характер, что можно использовать при прогнозе качественного изменения микробной системы, и, как следствие – оценки степени деградации почв.

#### **Теоретическая и практическая значимость**

Предложенная схема эколого-экономической оценки почв и земель может быть использована при разработке комплекса природоохранных мероприятий для территории Пензенской области на различных уровнях ее административно-хозяйственного устройства.

#### **Методология и методы исследования**

В работе использованы классические методики эколого-экономической оценки деградации почв и земель (оценка ущерба/ вреда от деградации почв и земель, методика нейтрального баланса деградации земель, методика «действия»/ «бездействия»). Значительную долю работы занимают традиционные микробиологические методы определения процессов и численности микроорганизмов, а также статистическая обработка и анализ данных. Подробное описание методик изложено в Главе 2.

#### **Степень достоверности и апробация результатов**

Достоверность полученных результатов подтверждается большим фактическим материалом, собранным во время исследования, а также публикациями в рецензируемых изданиях, входящих в систему RSCI. Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на Всероссийской научной конференции «Проблемы агрохимии и экологии – от плодородия к качеству почвы» (Москва, 2021), Всероссийской научной конференции «Агрохимическая наука - синтез

академических знаний и практического опыта» (Москва, 2023).

### **Публикации**

По теме диссертации опубликовано 8 научных работ, из них 5 публикаций в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базах Scopus, Web of Science, RSCI, а также 1 публикация из дополнительного списка рецензируемых научных изданий, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальностям 1.5.15 – Экология и 1.5.11 – Микробиология.

### **Личный вклад автора**

Автор собрал и обобщил литературные данные, организовал и провел полевой выезд на объект исследований, выполнил основную часть лабораторных работ, провел обработку данных, участвовал в подготовке публикаций по теме исследования. В работе [5] автором внесен основополагающий вклад. В работе [1] вклад автора составил 0,10 п.л. из 0,56 п.л., в работе [2] – 0,12 п.л. из 0,74 п.л., в работе [3] – 0,10 п.л. из 0,58 п.л., в работе [4] – 0,13 п.л. из 1,01 п.л., в работе [6] – 0,10 п.л. из 0,72 п.л., в работе [7] – 0,10 п.л. из 0,58 п.л., в работе [8] – 2 п.л. из 26 п.л.

### **Структура и объем работы**

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, выводов, списка литературы и приложения. Материалы работы изложены на 192 страницах, содержат 60 таблиц, 43 рисунка, приложение на 35 страницах. Список литературы включает 160 источников, в том числе 66 – на иностранном языке.

### **Благодарности**

Автор глубоко признателен руководителям д.б.н., профессору О.А. Макарову, к.б.н. Л.А. Позднякову за неоценимую помощь в подготовке данной работы, ценные советы и поддержку. Отдельную благодарность автор выражает д.б.н. доценту В.В. Демидову, д.б.н. доценту Л.В. Лысак, д.б.н. профессору Н.А. Манучаровой, д.б.н. профессору П.А. Кожевину, к.э.н. А.С. Строкову, к.б.н. Е.В. Цветнову, к.б.н. А.В. Якушеву, к.б.н. М.М. Карпухину, к.б.н. А.А. Белову, к.б.н. Н.Р. Крючкову, Д.Р. Абдулхановой, Н.А. Мараховой, О.В. Черкасовой, Е.Н. Есафовой, И.А. Ильичеву. Автор выражает благодарность сотрудникам кафедры эрозии и охраны почв, а также коллективу кафедры биологии почв. Автор благодарен к.б.н. А.С. Сорокину и к.б.н. М.С. Розановой за ценные советы при подготовке диссертации. Автор работы также выражает благодарность членам своей семьи за помощь в подготовке работы и

проведении полевых работ, а также за моральную поддержку. Исследование выполнено при поддержке гранта РФФИ № 19–29–05021 мк.

## ГЛАВА 1. ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О ДЕГРАДАЦИИ ПОЧВ И ЗЕМЕЛЬ И ПОДХОДАХ К ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ОЦЕНКЕ

Деградация земель может рассматриваться как потеря фактической или потенциальной продуктивности, или полезности в результате природных или антропогенных факторов; это снижение качества земель или уменьшение их продуктивности (Eswaran et al., 2019).

В настоящее время существует несколько подходов к эколого-экономической оценке деградации земель (табл. 1).

**Таблица 1.** Подходы к эколого-экономической оценке, используемые в работе

Метод	Описание	Применение
1.«Методика определения размеров ущерба от деградации почв и земель» (Утверждена приказом Роскомзема и Минприроды России от 17 июля 1994 г.)	Оценка степени деградации и ущерба/вреда, вызванного деградацией земель, путем сопоставления характеристик деградированных почв с эталонными. Рассчитанное и выраженное в денежном эквиваленте значение ущерба является ценой работ по восстановлению территории.	Применяется на уровнях агрохозяйства, муниципального района, области, национальном. Оценивается состояние земель в текущее время.
2.Подход нейтрального баланса деградации земель, (НБДЗ) (Kust et al., 2017)	Оценка степени деградации путем расчёта баланса деградации относительно предыдущего уровня. НБДЗ – это состояние территории, в соответствии с которым объём и качество земельных ресурсов, необходимых для поддержания экосистемных функций, остаются стабильными или увеличиваются в определенных временных и пространственных масштабах.	Применяется на уровнях агрохозяйства, муниципального района, области, национальном, глобальном. Оценивается изменение состояния земель в определенный период.
3.Методика «действия»/ «бездействия», экономика деградации земель (ЭДЗ) (von Braun et al., 2013)	Оценка степени деградации на основе сравнения различных экономических сценариев развития землепользования. Предлагается сценарий по изменению управления земельными ресурсами и сценарий, который не предполагает изменения землепользования.	Применяется на уровнях агрохозяйства, муниципального района, области, национальном, глобальном. Прогнозируется рентабельность вложений в изменение типа землепользования.

Метод	Описание	Применение
<b>Предлагаемый подход</b>		
4.Микробиологическая индикация показателей степени деградации почвы от агроистощения	Оценка степени деградации почвы с помощью микробиологических показателей – удельной азотфиксации и активной биомассы прокариот. Эти показатели выведены с помощью статистического анализа взаимосвязи микробиологических показателей со степенью деградации почвы.	Данный подход используется на уровне агрохозяйства, но может быть расширен и на другие уровни. С помощью данного метода можно оценить не только текущее состояние почвы, но и спрогнозировать дальнейшее развитие деградационных процессов и необходимость изменения землепользования.

## ГЛАВА 2. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

### 2.1. Объекты исследования

Объектами исследования являются почвы и земли сельскохозяйственного назначения Пензенской области. Исследования проводились на 3-х административных уровнях: территория агрохозяйств «Евлашевское» и «Трудовой путь» Кузнецкого муниципального района, Кузнецкий муниципальный район и Пензенская область в целом (табл. 2).

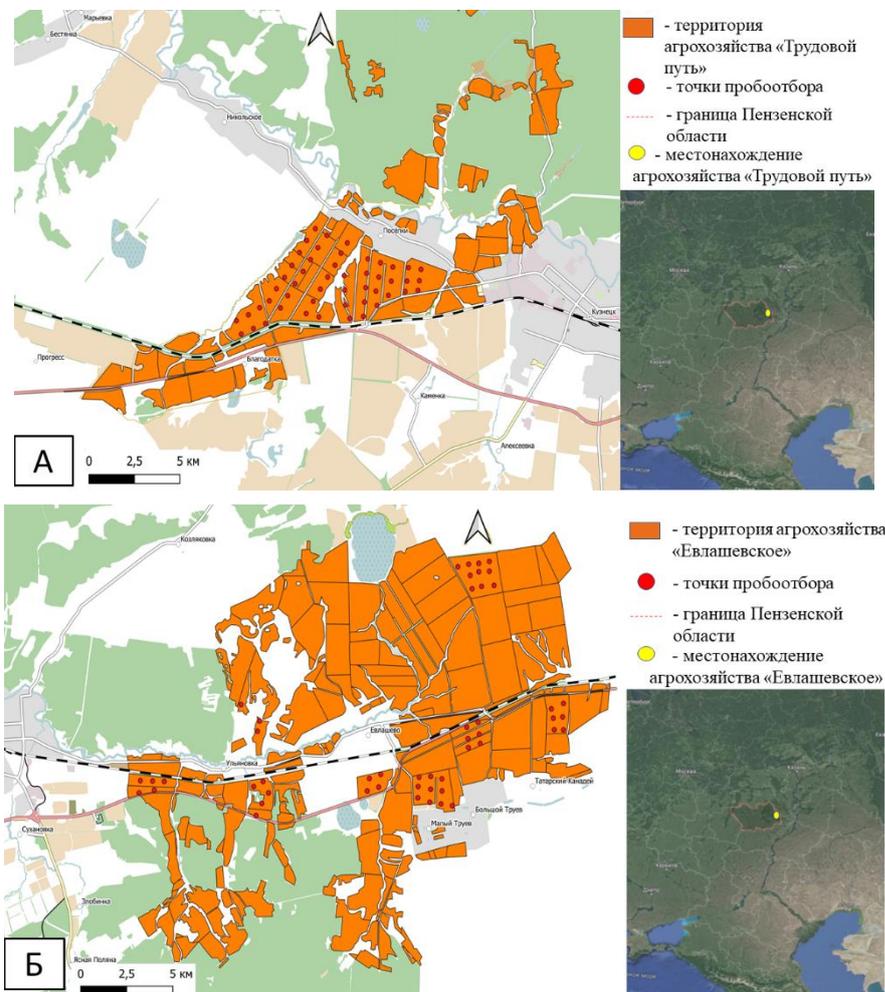
**Таблица 2.** Сводная характеристика объектов исследования в Пензенской области (Атлас Пензенской области, 2020)

Характеристика	Агрохозяйство «Трудовой путь»	Агрохозяйство Евлашевское»	Кузнецкий муниципальный район	Пензенская область в целом
<b>Общая площадь, га</b>	3 852	11 233	207 100	4 335 200
<b>Климат</b>	Умеренный континентальный климат с умеренно- жарким летом			
<b>Рельеф</b>	Холмисто-равнинный		Денудационная северо-западная часть Приволжской возвышенности	Между Окско-Донской низменностью и северо-западной частью Приволжской возвышенности
<b>Растительность</b>	Лесостепная зона с мелколиственными участками		Сосново-мелколиственные леса, разнотравно-злаковые степи	Восточно-Европейская провинция лесостепной зоны
<b>Почвы</b>	В пределах лесостепной зоны: серые лесные почвы, черноземы выщелоченные			

## 2.2. Методы исследования

### 2.2.1. Методика оценки ущерба от деградации почв и земель

**1 этап.** Летом 2020 г. на территории агрохозяйств «Трудовой путь» и «Евлашевское» проводился отбор смешанных проб почвы по регулярной сетке (площадь ячейки 20 га). Схема пробоотбора приведена на Рисунке 1 А, Б.



**Рисунок 1 А, Б.** Схема отбора смешанных проб почвы на территории агрохозяйств «Трудовой путь» (А) и «Евлашевское» (Б)

Глубина пробоотбора почв 0-0,2 м. Всего было отобрано 100 проб, по 50 для каждого агрохозяйства. Исследуемые показатели определялись общепринятыми методами: содержание подвижных форм фосфора и калия (ГОСТ 26204-91), рН (Н<sub>2</sub>О) (ГОСТ 26423-85), рН (КСl) (ГОСТ 26483-85), гумус по Тюрину в модификации Никитина с колориметрическим окончанием по Орлову-Гриндель (Минеев и др., 2001), плотность по Н.А. Качинскому (Качинский, 1958).

Для определения степени деградации почв использовались показатели их физико-химического и физического состояния. Перечень показателей приведен в

Таблице 3.

**Таблица 3.** Исследуемые показатели состояния почв Пензенской области

	«Трудовой путь», «Евлашевское»	Кузнецкий район	Пензенская область
<b>Показатели</b>	-Подвижный фосфор -Обменный калий -Гумус -рН Н <sub>2</sub> О/КСl -Плотность сложения	-Подвижный фосфор -Обменный калий -Гумус -рН Н <sub>2</sub> О/КСl	-Подвижный фосфор -Обменный калий -Гумус -рН Н <sub>2</sub> О/КСl

Ранжирование показателей деградации почв и земель проводилось по пятибалльной шкале в соответствии с «Методическими рекомендациями по выявлению деградированных и загрязненных земель» (1994) путем сопоставления с показателями недеградированных аналогов (эталонов) – Таблица 4.

**Таблица 4.** Определение степени деградации почв и земель по выбранным показателям

Показатель	Степень деградации					Эталон чернозема выщелоченного (Савич и др., 2003)
	0	1	2	3	4	
Уменьшение запасов гумуса в профиле почвы, в % от исходного	<10	11-20	21-40	41-80	>80	6%
Уменьшение содержания обменного калия, в % от средней степени обеспеченности	<10	11-20	21-40	41-80	>80	150 мг/кг
Уменьшение рН в % от средней степени кислотности	<10	11-15	16-20	21-25	>25	6,2
Уменьшение содержания подвижного фосфора, в % от средней обеспеченности	<10	11-20	21-40	41-80	>80	150 мг/кг

**2 этап.** Расчет ущерба от деградации почв проводили в соответствии с «Методикой определения размеров ущерба от деградации почв и земель» (1994) по формуле (1):

$$Ущ = Нс \times S \times Кэ \times Кс \times Кп + Дх \times S \times Кв, \quad (1)$$

Где:	Расшифровка	Значение	Источник
<b>Нс</b>	нормативная стоимость участка	57 300 руб./га	Приказ Министерства..., 2022
<b>Кэ</b>	коэффициент экологической ситуации территории	1,9	Методика определения размеров ущерба от деградации почв и земель, 1994
<b>Кв</b>	коэффициент пересчета восстановления	0,9	
<b>Кс</b>	коэффициент пересчета в зависимости от изменения степени деградации почв	1 – 4 степень 0,8 – 3 степень 0,5 – 2 степень 0,2 – 1 степень	
<b>Кп</b>	коэффициент для особо охраняемых территорий	1	
<b>Дх</b>	годовой доход с единицы площади	62 800 руб./га.	Усредненные данные агрохозяйств
<b>S</b>	площадь деградированных почв и земель, га	На основании проведенных расчетов	

#### 2.2.2. Оценка нейтрального баланса деградации земель

Индекс НБДЗ – рассчитывался по стандартной и модифицированной методикам. Для расчетов по стандартной методике использовался модуль Trends.Earth (Trends. Earth. Conservation International, 2018), период исследования – с 2000 по 2010 гг. Деградация оценивалась по 3-м основным параметрам, рекомендованным КБО ООН: продуктивности земель, изменению наземного покрова и запасам почвенного органического углерода (ПОУ) в слое 0-30 см (Макаров и др., 2021).

Для расчетов по модифицированной методике в стандартную методику был внесен ряд корректив: индикатор запасов ПОУ был заменён на индикатор содержания органического вещества в пахотном горизонте, предоставленного агрохимической службой Пензенской области и данными натурного обследования. Также использовались данные агрохимической службы Пензенской области и натурного обследования по содержанию подвижных форм калия и фосфора (по Чирикову) и по кислотности пахотного горизонта почв. Сравнение по перечисленным выше параметрам проводилось по средним значениям данных показателей на землях сельскохозяйственного назначения в период с 2000 по 2010 гг (Макаров и др., 2021).

#### 2.2.3. Применение методики экономики деградации земель (методики

### «действия»/ «бездействия»)

В рамках данной работы подход экономики деградации земель (ЭДЗ) (von Braun et al., 2013) был модифицирован (в частности, для изучения сценариев землепользования использовались величина ущерба от деградации почв и земель). Горизонт планирования составил 20 лет. Рассчитывалось два сценария землепользования: сценарий «действия против деградации» (учитывающий стоимость борьбы с деградацией земель) и сценарий «бездействия» (не учитывающий никаких мероприятий по борьбе с деградацией земель). Главным показателем экономической эффективности работ по восстановлению земель выступает соотношение цены «бездействия» и цены «действия». Если оно больше единицы – то борьба с деградацией земель экономически оправдана и наоборот (Макаров и др., 2022).

#### 2.2.4. Определение микробиологических показателей

Для определения микробиологической активности почв и численности микроорганизмов в них были выбраны две трансекты в обоих агрохозяйствах. Всего было проанализировано 25 объектов, представляющих собой пробы почвы чернозёма выщелоченного, различающиеся по степеням деградации и содержанию гумуса, обменного калия, подвижного фосфора и кислотностью. В анализ проб входило: определение базального дыхания (БД), субстрат-индуцированного дыхания (СИД), расчет микробного метаболического коэффициента ( $qCO_2$ ) (Ананьева и др., 2011); определение азотфиксации (Эмер и др., 2014); потенциальной, актуальной активности денитрификации (Эмер и др., 2017) и эмиссии метана (Новиков и др., 2010); а также учет общей численности бактерий (Методы почвенной микробиологии и биохимии, 1991) и численности метаболически активных бактерий и архей (Семенов и др., 2016).

## **ГЛАВА 3. ДЕГРАДАЦИЯ ПОЧВ И ЗЕМЕЛЬ ПО ОСНОВНЫМ АГРОХИМИЧЕСКИМ СВОЙСТВАМ**

### **3.1. Деградация почв и земель агрохозяйств «Трудовой путь» и «Евлашевское» по основным агрохимическим показателям**

По результатам оценки степеней деградации по исследуемым параметрам

можно сделать следующие заключения (рис. 2).



**Рисунок 2.** Дегradация по показателям в агрохозяйствах А – «Евлашевское», Б – «Трудовой путь»: 1 – снижение содержание гумуса, 2 – подкисление, 3 – снижение содержания обменного калия, 4 – снижение содержания подвижного фосфора

- Снижение содержания гумуса на территории агрохозяйства «Трудовой путь» соответствуют 2-й (средней) и 3-й (высокой) степени дегradации, на территории агрохозяйства «Евлашевское» - аналогично, но присутствует значительная доля недеградированных почв (Макаров и др., 2023);
- Изменение кислотности почвы наиболее выражено на территории агрохозяйства «Трудовой путь», где большая доля почв находится в 4-й (очень

высокой) степени деградации, в агрохозяйстве «Евлашевское» основная часть почв соответствует 2-й (средней) и 3-й (высокой) степени деградации (Макаров и др., 2023);

- По показателю «содержание обменного калия» для обоих агрохозяйств характерна большая доля недеградированных земель, однако локально встречаются участки с более выраженной деградацией, вплоть до 3-й (высокой) степени (Макаров и др., 2023);
- Наибольшие значения степени деградации в обоих агрохозяйствах обнаружены для показателя «содержание подвижного фосфора»: в основном распространена 3-я (высокая) степень (Макаров и др., 2023).

### **3.2. Деградация почв и земель Кузнецкого муниципального района и Пензенской области**

Кузнецкий муниципальный район и Пензенская область в целом характеризуются схожей степенью выраженности деградационных процессов на землях сельскохозяйственного назначения по ключевым агрохимическим почвенным свойствам:

- наибольший уровень деградации для территорий и района и области определен для показателей содержания подвижного фосфора (Макаров и др., 2023);
- почвы района испытывают недостаток содержания гумуса наравне с недостатком содержания подвижного фосфора (Макаров и др., 2023);
- почвы области в большей степени подвержены деградации по изменению кислотности, чем по снижению содержания гумуса (Макаров и др., 2023);
- почвы района и области в меньшей степени испытывают недостаток содержания обменного калия (Макаров и др., 2023).

## **ГЛАВА 4. ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ДЕГРАДАЦИИ ПОЧВ И ЗЕМЕЛЬ**

### **4.1. Оценка ущерба от деградации**

Величины удельного ущерба от деградации почв и земель агрохозяйств «Евлашевское» и «Трудовой путь» составили 69166 руб./га и 131 638 руб./га,

соответственно. Кадастровая стоимость с/х земель для данной территории на основании Приказа Министерства государственного имущества Пензенской области от 8 июня 2022 года N 202-пр равняется 53700 руб./га, то есть величина ущерба в первом случае выше кадастровой стоимости в 1,3 раза, а во втором – почти в 2,5 раза. Почвы обоих агрохозяйств подвержены различным процессам деградации, среди которых наибольший ущерб отмечается для показателей: «содержание подвижного фосфора», «содержание гумуса» и подкисления (табл. 5, 6). Величина ущерба от уменьшения содержания обменного калия несколько меньше. Обращает на себя внимание тот факт, что для территорий обоих агрохозяйств установлены ареалы, имеющие все степени деградации (от 0-й до 4-й) по каждому из показателей. Такая «мозаичность» почвенных свойств свидетельствует о влиянии различных факторов на деградацию территории (внесение или невнесение удобрений, эрозии, применение различных типов севооборотов и т.д.).

**Таблица 5.** Значение показателей ущерба от деградации почв на территории агрохозяйства «Евлашевское»

Процесс	S, га	Удельный ущерб, руб./га	Вклад, %
Снижение содержания гумуса	2103	17 827	25,77
Уменьшение рН	2671	17 295	25,02
Снижение содержания обменного калия	1565	13 715	19,82
Снижение содержания подвижного фосфора	2406	20 328	29,39
<b>Итого</b>	<b>8745</b>	<b>69 166</b>	<b>100</b>

**Таблица 6.** Значение показателей ущерба от деградации почв на территории агрохозяйства «Трудовой путь»

Процесс	S, га	Удельный ущерб, руб./га	Вклад, %
Снижение содержания гумуса	719	32 933	25,01
Уменьшение рН	674	34 073	25,88
Снижение содержания обменного калия	581	29 350	22,29
Снижение содержания подвижного фосфора	625	35 280	26,82
<b>Итого</b>	<b>2599</b>	<b>131 638</b>	<b>100</b>

Удельный ущерб для территории Кузнецкого района составил 124 236 руб./га (табл. 7), что, в целом соответствует величине удельного ущерба для агрохозяйства «Трудовой путь» (131638,06 руб./га) и существенно выше удельного ущерба для агрохозяйства «Евлашевское» (69166, 91 руб./га). Удельный ущерб для территории Пензенской области в целом составил 111 773 руб./га (табл. 8). Основной вклад в общую величину ущерба от деградации внесли показатели уменьшения содержания подвижного фосфора и изменения кислотности почв.

**Таблица 7.** Значение показателей ущерба от деградации почв на территории Кузнецкого муниципального района Пензенской области

Процесс	S, га	Удельный ущерб, руб./га	Вклад, %
Снижение содержания гумуса	27 700	33 142	26,68
Уменьшение рН	14 100	30 470	24,53
Снижение содержания обменного калия	14 250	27 753	22,33
Снижение содержания подвижного фосфора	14 175	32 870	26,46
<b>Итого</b>	<b>70 225</b>	<b>124 236</b>	<b>100</b>

**Таблица 8.** Значение показателей ущерба от деградации почв на территории Пензенской области в целом

Процесс	S, га	Удельный ущерб, руб./га	Вклад, %
Снижение содержания гумуса	304 675	23 115	20,68
Уменьшение рН	506 725	29 016	25,95
Снижение содержания обменного калия	516 600	25 852	23,12
Снижение содержания подвижного фосфора	531 875	33 789	30,25
<b>Итого</b>	<b>1 859 875</b>	<b>111 773</b>	<b>100</b>

Почвы и земли южной части Пензенской области характеризуются средними и высокими значениями удельного ущерба от деградации, что обусловлено доминированием на этой территории черноземных почв, вовлечённых в сельскохозяйственное производство (рис. 3).

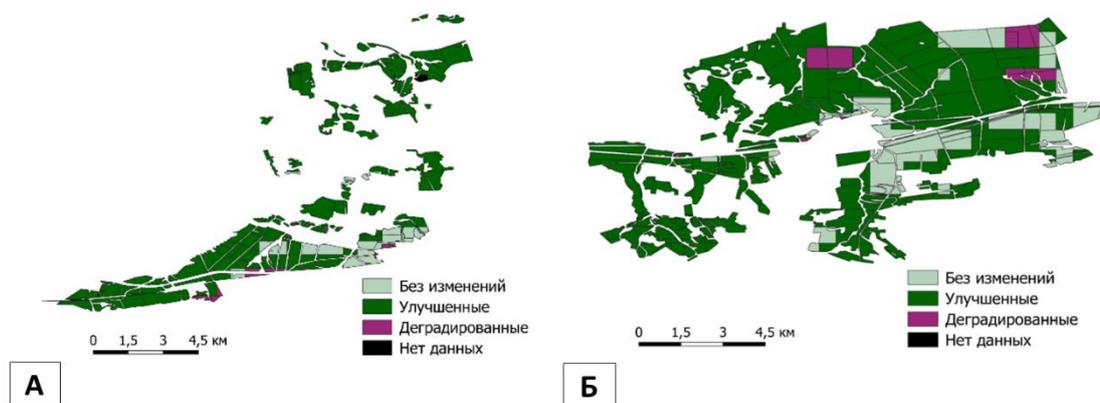
Напротив, в северной и северо-восточной части региона зафиксированы низкие значения удельного ущерба, что связано с сильно расчлененной местностью и менее плодородными почвами (на данной территории активность сельскохозяйственной деятельности не такая высокая).



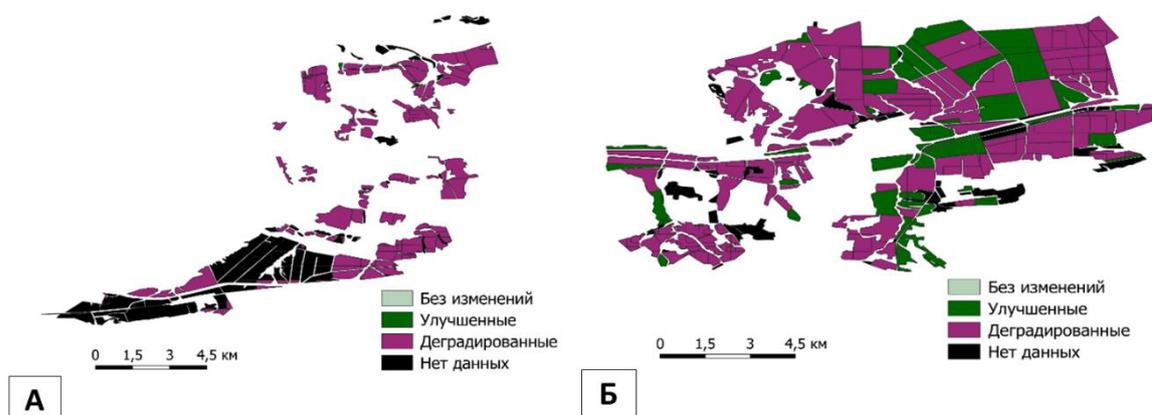
**Рисунок 3.** Картосхема распределения величины удельного ущерба от деградации почв и земель по различным муниципальным районам Пензенской области

## 4.2. Расчет индекса нейтрального баланса деградации земель

Расчеты, проведенные по модифицированной методике, показали резкое увеличение по сравнению с результатами расчетов, выполненных по стандартной методике (рис. 4 А, Б), площади пахотных земель с деградацией – до 67,8% от общей площади пашни агрохозяйства «Евлашевское» и 59,4% от общей площади пашни агрохозяйства «Трудовой путь» (рис. 5 А, Б). Величина индекса НБДЗ становится отрицательной и составляет «-43,3%» для агрохозяйства «Евлашевское» и «-59,2%» для агрохозяйства «Трудовой путь». Основной вклад в резкое увеличение доли деградированных земель вносят агрохимические показатели: за оцениваемый период времени произошло заметное падение содержания в почвах обоих агрохозяйств подвижного фосфора, обменного калия, гумуса и подкисление почв.



**Рисунок 4 А, Б** Итоговая карта расчета показателя НБДЗ для пахотных угодий агрохозяйства «Трудовой путь» (А) и «Евлашевское» (Б) по стандартной методике «Trends.Earth».



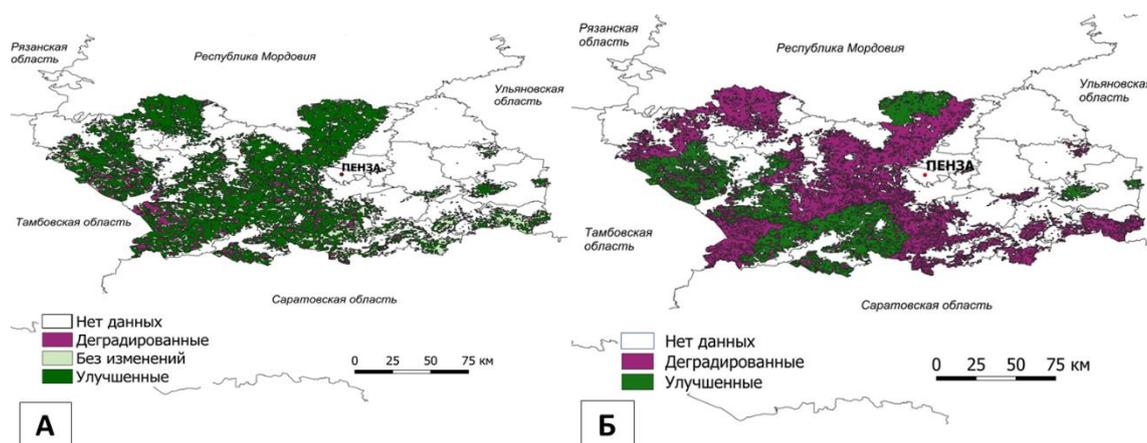
**Рисунок 5 А, Б.** Итоговая карта расчета показателя НБДЗ для пахотных угодий агрохозяйства «Трудовой путь» (А) и «Евлашевское» (Б) по модифицированной методике

Для территории Кузнецкого муниципального района также, как и для территории агрохозяйств наблюдается тенденция увеличения деградированных земель при применении модифицированной – индекс НБДЗ уменьшается с 67,22% до 27,11%.

При применении стандартной методики 70,70% от площади всех пахотных земель Пензенской области улучшили свое состояние за изучаемый период (табл. 9, рис. 6 А). Ведущую роль здесь сыграл показатель продуктивности, базирующийся на показателе NDVI. Основные площади деградированных земель расположены в юго-западной части области, где доминируют по площади различные подтипы чернозёмных почв. Расчеты, проведенные по модифицированной методике, показали резкое увеличение площади пахотных земель с деградацией – до 67,54% от общей площади пашни региона. При этом основные массивы деградировавших в период 2000-2010 гг. пахотных земель находятся в центральной, юго-западной, юго-восточной и северо-западной частях области (рис. 6 Б).

**Таблица 9.** Расчет индекса нейтрального баланса деградации пахотных земель Пензенской области по стандартной и модифицированной методикам

Модификация методики	Деградированные земли, %	Улучшенные земли, %	Индекс НБДЗ
Стандартная методика	10,22	70,70	60,48
Модифицированная методика	67,54	32,42	-35,13



**Рисунок 6 А, Б.** Итоговая карта расчета показателя НБДЗ для пахотных угодий Пензенской области по стандартной методике (А) и модифицированной методике (Б).

### 4.3. Оценка экономики деградации земель (применение методики «действия»/ «бездействия»)

Результаты оценки эффективности «действия» и «бездействия» приведены в Таблице 10.

**Таблица 10.** Оценка эффективности «действия» и «бездействия» против деградации земель для 3-х иерархических уровней организации Пензенской области

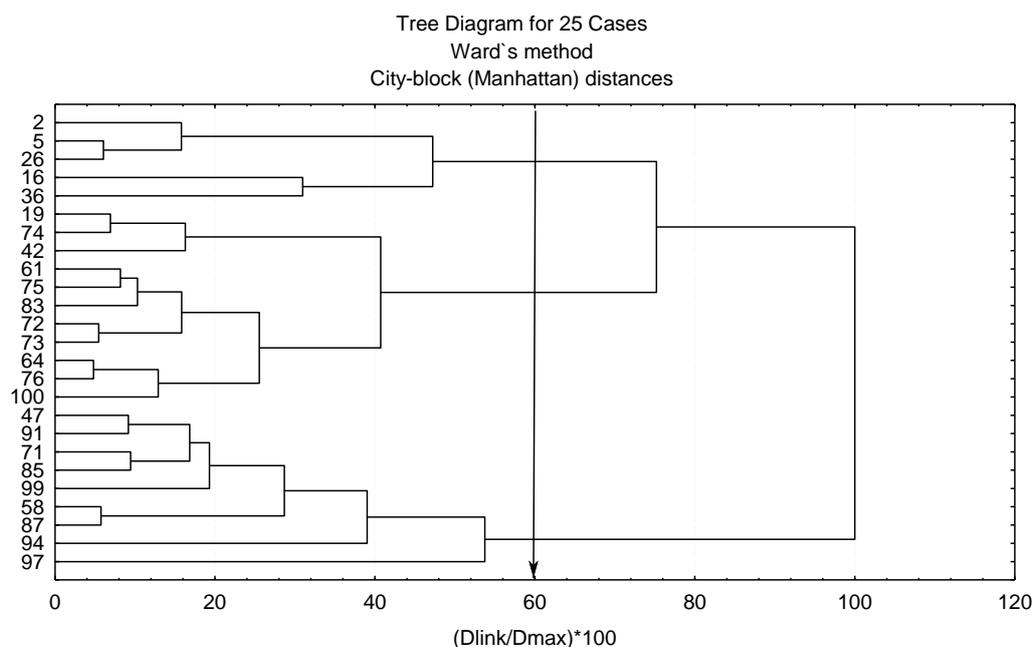
Показатели	Пензенская область	Кузнецкий район	Агрохозяйство «Трудовой путь» *
Стоимость «действия» на период 20 лет, руб.	775 025 025 253	9 834 239 065	417 601 017
Стоимость «бездействия» на период 20 лет, руб.	151 709 100 366	15 477 218 602	526 387 108
Соотношение стоимости «бездействия» к стоимости «действия»	<b>0,2</b>	<b>1,6</b>	<b>1,3</b>

*\*Примечание: для второго агрохозяйства расчет эффективности «действия»/ «бездействия» не проводился в виду близкого расположения и сходной сельскохозяйственной деятельности.*

Показатель экономической эффективности работ по восстановлению земель для Кузнецкого района и агрохозяйства, расположенного в этом районе, выше 1 (восстановление имеет смысл), для области в целом ниже 1 (восстановление земель смысла не имеет). Особенностью полученных результатов является противоречие между целесообразностью восстановления земель для области в целом, с одной стороны, и для района и агрохозяйства, с другой стороны. Указанный факт может свидетельствовать о «нетипичности» процессов деградации земель в районе и в агрохозяйстве по сравнению с регионом в целом (Строков и др., 2022).

## ГЛАВА 5. МИКРОБИОЛОГИЧЕСКАЯ ИНДИКАЦИЯ СТЕПЕНИ ДЕГРАДАЦИИ ПОЧВ ПО ПОКАЗАТЕЛЯМ АГРОИСТОЩЕНИЯ

Применение комплекса методов изучения микробиологических свойств почв позволило установить их взаимосвязь с показателями их агроистощения (рис. 7).



**Рисунок 7.** Результаты кластерного анализа микробиологических показателей почв агрохозяйств.

Кластерный анализ позволяет разделить изучаемые пробы почвы на 3 кластера. Далее значения агрохимических показателей почв были заменены на степени их деградации, рассчитанных ранее по Методике определения размеров ущерба от деградации почв и земель (1994).

Затем, разделив объекты на кластеры и группы внутри кластера, была посчитана усредненная степень деградации для каждого объекта (табл. 11). Выявлено, что в первом кластере представлены относительно слабodeградированные почвы, со средней степенью деградации от 0,75 до 1,25. Усредненное значение степени деградации в этом кластере равняется 1,1 (слабodeградированная почва). Во втором кластере представлены почвы, среднее значение степени деградации которых варьирует от 1,5 до 1,75, то есть образцы в этом кластере имеют явно выраженную слабodeградированную степень, которая стремится к среднедеградированной. В 3 кластере объекты имеют явно выраженную 2 степень деградации (Чекин, 2024).

**Таблица 11.** Состав кластеров, распределение на группы и соответствие степени деградации

Кластер	№ пробы почвы	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Гумус	pH	Средняя степень деградации по пробе	Усредненное значение степени деградации в кластере
1	26	0	3	0	0	0,75	1,1
	5	0	3	0	1	1	
	2	0	4	0	1	1,25	
	16	0	3	1	1	1,25	
2	74	0	3	1	2	1,5	1,6
	61	1	3	2	0	1,5	
	75	0	3	1	2	1,5	
	83	0	3	2	1	1,5	
	73	0	3	2	1	1,5	
	64	0	3	2	1	1,5	
	100	1	3	1	1	1,5	
	36	2	3	0	2	1,75	
	19	2	3	0	2	1,75	
	42	0	3	2	2	1,75	
	72	1	3	3	0	1,75	
	76	0	3	2	2	1,75	
3	71	0	3	3	2	2	2,1
	85	1	3	3	1	2	
	99	1	3	2	2	2	
	58	0	4	3	1	2	
	87	1	2	3	2	2	
	94	1	3	1	3	2	
	47	1	4	3	1	2,25	
	91	1	3	3	2	2,25	
97	1	3	3	2	2,25		
Средняя степень деградации по показателю		0,6	3,1	1,7	1,4	1,7	

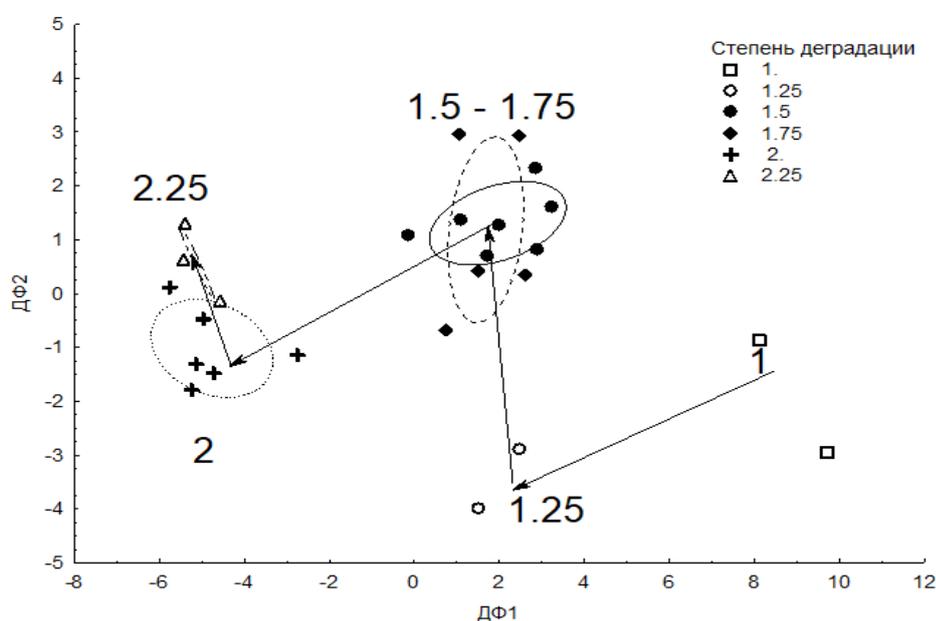
Обращает на себя внимание то, что средние степени деградации по показателям уменьшения содержания гумуса и изменения pH занимают почти крайние значения в кластере 2 (табл. 11). Минимальное и максимальное значение по показателям уменьшения обменного калия и подвижного фосфора может свидетельствовать о незначительном вкладе в распределение проб на кластеры (данные показатели являются «фоновыми»). Напротив, изменение показателей степени деградации по гумусу и pH может изменить принадлежность пробы к кластеру (Чекин, 2024).

Для выявления удобных для практического применения уравнений при классификации микробиологических показателей почвы, были найдены дискриминантные функции.

На основании взаиморасположения почвенных проб в плоскости, образованной дискриминантными функциями (ДФ) 1 и 2 (рис. 8), было установлено,

что имеются два биологических фактора – удельная азотфиксация и активная микробная биомасса прокариот, которые коррелируют со степенью деградации почвы по показателям агроистощения.

Функция ДФ1 позволяет выявить три диапазона степеней деградации почвы: <1, 1,25-1,75, 2-2,25. Функция ДФ2 позволяет дополнительно разделить степень деградации 1,25 от интервала 1,5-1,75 (если значения ДФ2 меньше 1,5, то пробу следует отнести к средней степени деградации 1,25 и, соответственно, наоборот) и степень деградации 2 от степени 2,25 (если значения ДФ2 меньше 0, то пробу следует отнести к средней степени деградации 2 и наоборот) (Чекин, 2024).



**Рисунок 8.** Взаиморасположения почвенных образцов в плоскости, образованной дискриминантными функциями (ДФ) 1 и 2. Корреляционные эллипсы ограничивают область 95% вероятности нахождения на плоскости образцов почвы той или иной степени деградации. Стрелками показано направление последовательного увеличения степени деградации.

Дискриминантные функции можно использовать для биоиндикации степени деградации горизонтов чернозёма выщелоченного.

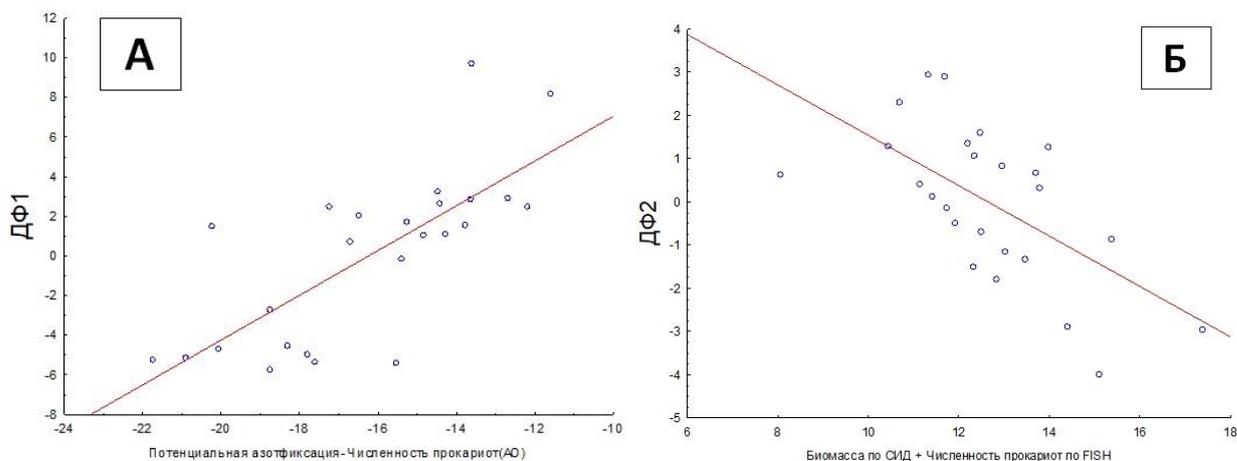
Были предложены упрощенные варианты ДФ1 и ДФ2.

$$\text{ДФ1} = 18,35 + 1,13 * (\text{Потенциальная азотфиксация} - \text{Численность прокариот}) \quad (2)$$

$$r = 0,73; p = 0,00002; r^2 = 0,54.$$

$$ДФ2 = 7,37 - 0,58 * (\text{Биомасса по СИД} + \text{Численность прокариот по FISH}) \quad (3)$$

$$r = -0,60; p = 0,001; r^2 = 0,36 \text{ (рис.9 А, Б).}$$



**Рисунок 9 А, Б.** Корреляция между ДФ1 и разностью потенциальной азотфиксации и общей численностью прокариот (АО) (А) и корреляция между ДФ2 и суммой биомассы микроорганизмов по СИД с численностью прокариот по FISH (Б).

Этим упрощенным формулам (2) и (3), отражающим факторы, связанные с деградацией почв, можно дать биологическое объяснение. Разность: «Потенциальная азотфиксация – Общая численность прокариот (АО)» можно интерпретировать как удельную азотфиксирующую активность прокариот, которая уменьшается по мере деградации агрохимических показателей горизонта чернозема. Сумма биомассы по СИД и численность прокариот по FISH отражают активную (а не общую) биомассу микроорганизмов (клетки, реагирующие на внесение глюкозы дыхательным откликом или содержащие много рРНК). Если СИД учитывает и грибы, и бактерии, то второе слагаемое - только прокариот, что подчеркивает значимость именно активной биомассы прокариот. По мере увеличения деградации, величина активной биомассы периодически падает, предвзяя собой существенную перестройку микробной системы в определенных диапазонах степеней деградации. Таким образом «волнообразные» колебания активной биомассы свидетельствуют об изменении агрохимических свойств почвы, что в итоге указывает на увеличение степени их деградации (Чекин, 2024).

Стоит отметить, что при помощи данных показателей оценивается состояние земель в текущее время. При неизменности внешних факторов (внесение удобрений, изменение типа землепользования и т.д.), уменьшение удельной азотфиксации

отражает переход от слабой к средней степени деградации, при этом предшествующее снижение активной биомассы, позволяет спрогнозировать изменение степени деградации. Это дает возможность применять данные показатели в методике «действия»/ «бездействия» с целью определения наиболее рационального типа землепользования.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Проведение эколого-экономической оценки деградации почв и земель на трех уровнях административно-хозяйственного устройства Пензенской области показало неоднородность деградационных процессов. Величины удельного суммарного ущерба на всех уровнях организации определяются характером, интенсивностью и распространенностью деградационных процессов в почвах. Совместное использование оценки ущерба и НБДЗ дает более полное представление о масштабах и скорости проявления деградационных процессов, которое можно использовать для разработки систем устойчивого землепользования в конкретных агрохозяйствах. Результаты применения методики Й. фон Брауна свидетельствуют о существенной неравномерности развития сельскохозяйственного производства на территории Пензенской области, в том числе тех его направлений, которые приводят к минимизации процессов деградации земель. НБДЗ показывает состояние земель в прошлом, оценка ущерба от деградации определяет текущее состояние земельных ресурсов, а методика Й. фон Брауна прогнозирует и рекомендует необходимость мероприятий по восстановлению в будущем. Проведенные исследования показали возможность определения степени деградации почвы с помощью двух микробиологических показателей – удельной азотфиксирующей активностью прокариот и активной микробной биомассы прокариот. Это позволит не только более точно определять состояние земельных ресурсов в динамике и в настоящем, но и прогнозировать изменение экосистемы в будущем.

## **ВЫВОДЫ**

1. Высокие значения удельного ущерба/вреда от деградации (агроистощения) почв и земель Пензенской области (111 тыс. руб./га для региона в целом, 124 тыс. руб./га для Кузнецкого муниципального района, 132 тыс. руб./га для агрохозяйства

«Трудовой путь», 70 тыс. руб./га для агрохозяйства «Евлашевское») свидетельствуют о значительных экономических потерях региона в результате интенсивной сельскохозяйственной деятельности и говорят о необходимости проведения рекультивации деградированных земель.

2. На основании стандартных установок, заложенных в платформу «Trends.Earth», доля деградированных земель для расчета нейтрального баланса деградации земель за период 2000-2010 гг. в Пензенской области в целом составила 10,22% (индекс НБДЗ – «+60,48%»), в Кузнецком муниципальном районе – 9,92% (индекс НБДЗ – «+67,22»), в агрохозяйствах «Евлашевское» и «Трудовой Путь» – соответственно 4,7% (индекс НБДЗ – «+71,7%») и 2,4% (индекс НБДЗ – «+81,8»). Добавление показателей содержания гумуса, обменного калия, подвижного фосфора и кислотности в почвах существенно повышает по сравнению со стандартной методикой долю деградированных земель.

3. Оценка «действия»/ «бездействия» выявила экономическую оправданность инвестиций в восстановление продуктивности земель на 20-летнем горизонте планирования для Кузнецкого муниципального района и агрохозяйства «Трудовой путь», расположенного в этом районе. В восстановление продуктивности земель Пензенской области в целом (на том же горизонте планирования) такие инвестиции не оправданы.

4. Показана принципиальная возможность оценивать степень деградации по состоянию почвенного микробного сообщества. Для биоиндикации средней степени деградации пахотного и гумусо-аккумулятивного горизонтов чернозёма выщелоченного по показателям агроистощения предлагается использовать комбинацию микробиологических показателей – удельную азотфиксацию и активную микробную биомассу прокариот. По мере увеличения степени деградации почв активность азотфиксации закономерно падает, а изменения активной биомассы имеют волнообразный характер. Данные показатели можно использовать в методике оценки «действия»/ «бездействия» для определения оптимального типа землепользования.

*Научные статьи, опубликованные в журналах Scopus, WoS, RSCI:*

1. Макаров, О.А. Цветнов Е.В., Цветнова О.Б., Марахова Н.А., **Чекин М.Р.**, Кубарев Е.Н., Абдулханова Д.Р. Опыт оценки нейтрального баланса деградации земель Приволжского федерального округа (на примере Пензенской области) // *Агрохимический вестник*. — 2021. — № 5. — С. 8–11. DOI: 10.24412/1029-2551-2021-5-002. – ИФ РИНЦ (2022): 0,904.
2. Макаров О.А., Марахова Н.А., Красильникова В.С., Крючков Н.Р., **Чекин М.Р.**, Абдулханова Д.Р. Опыт оценки ущерба от деградации почв и земель муниципальных образований Российской Федерации // *Земледелие*. – 2022. – №. 4. – С. 3-7. DOI: 10.24412/0044-3913-2022-4-3-7. – ИФ РИНЦ (2022): 1,677.
3. Строков А.С., Макаров О.А., **Чекин М.Р.**, Цветнов Е.В., Абдулханова Д.Р., Кубарев Е.Н. Апробация концепции экономики деградации земель (на примере Пензенской области) // *Агрохимический вестник*. — 2022. — № 5. — С. 93–96. DOI: 10.24412/1029-2551-2022-5-018. – ИФ РИНЦ (2022): 0,904.
4. Макаров О.А., Абдулханова, Д.Р., Карпова, Д.В., Красильникова, В.С., Марахова, Н.А., Крючков, Н.Р., **Чекин М.Р.**, Беляева М.В., Балджиев А.С. Оценка ущерба от деградации почв и земель на трех иерархических уровнях административно-хозяйственного устройства Российской Федерации: субъектов, муниципальных образований и агрохозяйств // *Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение*. — 2023. — Т. 78, № 2. — С. 86–93. DOI: 10.55959/MSU0137-0944-17-2023-78-2-86-93. – ИФ РИНЦ (2021): 0,463. [Makarov O.A., Abdulkhanova D.R., Karpova D.V., Krasilnikova V.S., Marakhova N.A., Kryuchkov N.R., Chekin M.R., Belyaeva M.V., Baldjiev A.S. Assessment of damage from soil and land degradation at three hierarchical levels of the administrative and economic structure of the russian federation: Subjects, municipalities, and agricultural farms // *Moscow University Soil Science Bulletin*. — 2023. — Vol. 78, № 2. — P. 149–155. DOI: 10.3103/S0147687423020072 – SJR (2021): 0,18]
5. **Чекин М.Р.** Опыт микробиологической индикации агроистощения чернозема выщелоченного // *Агрохимический вестник*. — 2024. — № 1. — С. 88–94. DOI: 10.24412/1029-2551-2024-1-015. – ИФ РИНЦ (2022): 0,904.

*Научные статьи в изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальностям 1.5.15 – Экология и*

### ***1.5.11 – Микробиология:***

6. Макаров О.А., Строков А.С., Цветнов Е.В., **Чекин М.Р.**, Абдулханова Д.Р., Кубарев Е.Н., Марахова Н.А. Совмещенная оценка нейтрального баланса деградации земель и их эколого-экономического ущерба (на примере агрохозяйств Пензенской области) // Проблемы агрохимии и экологии. — 2021. — № 3-4. — С. 79–86. DOI: 10.26178/AE.2021.72.49.003. – ИФ РИНЦ (2022): 0,434.

### ***Другие работы по теме диссертации:***

7. Макаров О.А., Строков А.С., Цветнов Е.В., Марахова Н.А., Красильникова В.С., Крючков Н.Р., **Чекин М.Р.**, Макаров А.О., Абдулханова Д.Р. Опыт эколого-экономической оценки деградации земель агрохозяйств, расположенных в различных субъектах Российской Федерации // Использование и охрана природных ресурсов в России. — 2022. — № 2. — С. 116–120. – ИФ РИНЦ (2022): 0,287.

8. Экономика деградации земель и продовольственная безопасность регионов России / Под редакцией О.А. Макарова / Макаров О.А., Абдулханова Д.Р., Балджиев А.С., Беляева М.В., Карпова Д.В., Красильникова В.С., Крючков Н.Р., Марахова Н.А., Строков А.С., Цветнов Е.В., Цветнова О.Б., **Чекин М.Р.**, Черкасова О.В. — Москва: ООО МАКС Пресс, 2022. — 320 с. DOI: 10.29003/m3113.978-5-317-06906-3.

Полный список публикаций на странице соискателя в ИАС «Истина»: <http://istina.msu.ru/profile/4ekin/>