



**ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА И ОПТИМИЗАЦИЯ
ЗЕМЛЕПОЛЬЗОВАНИЯ СТЕПНЫХ АГРОЛАНДШАФТОВ
В УСЛОВИЯХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ
И АНТРОПОГЕННОЙ НАГРУЗКИ**

**Гринцов Д. А. ORCID ID 0000-0003-2147-0709,
Нестеренко М. Ю. ORCID ID 0000-0003-1465-0752,
Соломатин Н. В. ORCID ID 0000-0002-9623-8069**

*Оренбургский федеральный исследовательский центр Уральского отделения
Российской академии наук, Оренбург, Российская Федерация,
e-mail: arisstroy204@gmail.com*

Цель исследования – комплексная геоэкологическая оценка агроландшафтов, основанная на анализе пространственно-дифференцированных данных агрохимического и почвенно-физического обследования. В ходе исследования применен конвергентный подход, сочетающий методы ГИС-аналитики, геоэкологии и анализа полученных данных. Исследования проводились с 2015 по 2025 г. в условиях степной зоны Оренбургского Предуалья. Проведена геоэкологическая оценка стабильности почв на основе коэффициента комплексного плодородия. Кластерный анализ позволил выделить и картографировать четыре статистически достоверные ($p < 0,05$) типологические группы экологического состояния почв (ареалы землепользования), обусловленные режимом антропогенной нагрузки. Установлены статистически достоверные обратные корреляционные связи между показателем твердости почвы и запасом продуктивной влаги ($r = -0,87$, $p < 0,01$) и прямой связью с количеством рудеральных видов растений ($r = +0,79$). Выявлено, что в условиях степной зоны Южного Урала физико-механическое уплотнение почвы является доминирующим фактором снижения почвенного плодородия и деградации почв. На основе анализа полученных данных коэффициента комплексного плодородия разработана схема геоэкологического зонирования территории с дифференцированными рекомендациями в рамках устойчивого землепользования.

Ключевые слова: геоэкология, деградация почв, коэффициент комплексного плодородия, устойчивое землепользование

**GEOECOLOGICAL ASSESSMENT AND OPTIMIZATION
OF LAND USE IN STEPPE AGROLANDSCAPES
UNDER CLIMATE CHANGE AND ANTHROPOGENIC LOAD**

**Grintzov D. A. ORCID ID 0000-0003-2147-0709,
Nesterenko M. Yu. ORCID ID 0000-0003-1465-0752,
Solomatin N. V. ORCID ID 0000-0002-9623-8069**

*Orenburg Federal Research Center, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
Orenburg, Russian Federation, e-mail: arisstroy204@gmail.com*

Research aim: a comprehensive geoecological assessment of agricultural landscapes based on the analysis of spatially differentiated data from agrochemical and soil-physical surveys. A convergent approach combining GIS analytics, geostatistics, and analysis of the obtained data was employed. The research was conducted from 2015 to 2025 in the steppe zone of the Orenburg Cis-Urals. A geoecological assessment of soil stability was performed based on the integrated fertility coefficient. Cluster analysis enabled the identification and mapping of four statistically reliable ($p < 0,05$) typological groups of soil ecological status (land use areas) determined by the pattern of anthropogenic pressure. Statistically significant inverse correlations were established between soil hardness and available water storage ($r = -0,87$, $p < 0,01$) and a direct correlation with the number of ruderal plant species ($r = +0,79$). It was found that, in the steppe zone of the Southern Urals, mechanical soil compaction is the dominant factor reducing soil fertility and causing soil degradation. Based on the analysis of the obtained integrated fertility coefficient data, a geoecological zoning scheme for the territory was developed, providing differentiated recommendations for sustainable land use.

Keywords: geoecology, soil degradation, Integrated Fertility Coefficient, sustainable land management

Введение

Сохранение почв включает в себя защиту освоенных почв от качественной деградации, предотвращение негативных структурно-функциональных изменений, сохранение и восстановление естественных почв как компонента биосферы [1; 2]. Процессы почвенной эрозии, потери гумуса, уплотне-

ния почв, пастбищной дигрессии снижают продукционный потенциал агроценозов и ведут к системной утрате экологических функций и плодородия почвенного покрова [3; 4]. Проблемы деградации в степной зоне не являются разрозненными. Они представляют собой системное нарушение базовых экологических принципов. Антропогенная

нагрузка, не адаптированная к естественной устойчивости ландшафта, через процесс физического уплотнения почвы запускает каскад взаимосвязанных негативных изменений (гидрологических, биологических, продукционных) [5; 6].

Для решения этих задач проведена геоэкологическая оценка плодородия почв действующего сельскохозяйственного предприятия на площади 4132 га за 2015-2025 гг. В качестве инструмента исследования экологической стабильности почв был применён разработанный нами коэффициент комплексного плодородия ($K_{\text{кп}}$) почв. Его методическая новизна заключается в интеграции комплекса агроэкологических параметров физического состояния почв в единый показатель, количественно отражающий основу функционирования системы «почва – растение – атмосфера». Структурно-функциональная конструкция состоит из встроенных друг в друга различных показателей. При этом в качестве базовых критериев выбраны прежде всего физические, гидрологические и биологические параметры состояния почв. Агрохимические показатели сознательно не были включены в интегральный расчёт, поскольку они в значительной степени являются результатом текущего антропогенного управления (внесения удобрений) и обладают высокой временной изменчивостью.

Данный подход позволяет моделировать продуктивность на основе биологических и физических параметров состояния почв, формирует основу для междисциплинарного взаимодействия на стыке геоэкологии, агрономии и климатологии.

В результате кластерного анализа показателей коэффициента комплексного плодородия ($K_{\text{кп}}$) почв были выделены и картографированы четыре статистически достоверные ($p < 0,05$) типологические группы (ареалы землепользования), обусловленные режимом антропогенной нагрузки: «антропогенно-деградирующий», «антропогенно-стабильный», «антропогенно-восстановительный» и «адаптивно-ландшафтный». Данная классификация оказывает существенное влияние на выбор технологических типов воздействия на поч-

венные ресурсы, позволяет прогнозировать устойчивость агросистем к климатическим условиям и служит основой для оптимизации землепользования, обеспечивая баланс между сельскохозяйственной продуктивностью и долгосрочной экологической стабильностью [7; 8].

Цель исследования – проведение геоэкологической оценки состояния агроландшафтов с последующим зонированием территории для устойчивого землепользования; разработка научно обоснованных рекомендаций по агротехнологическим приемам исходя из анализа пространственных взаимосвязей между физическим состоянием почв, типами антропогенной нагрузки и их интегральными эффектами для сохранения почвенного плодородия, предотвращения негативных структурно-функциональных изменений почв.

Материалы и методы исследования

Основное внимание исследования уделялось анализу механизмов антропогенной трансформации почвенного покрова и регулированию микроклиматических условий в почве, повышению эффективности накопления влаги и оптимизации агрофизических свойств почв. Эти аспекты имеют ключевое значение для снижения деградации почвенного покрова, роста продуктивности агроландшафтов и повышения их устойчивости к аридным условиям Южного Урала и климатическим изменениям.

Методический аппарат

1. Агрегированная модель, на основе которой разработана формула расчета коэффициента комплексного плодородия ($K_{\text{кп}}$) почв [9]. Способ оценки комплексного плодородия почвы включает измерение фактических значений физических параметров почвы: запаса влаги в слое 0–100 см, мм (W), объёмной массы почвы в слое 0–30 см, г/см³ (D), твёрдости почвы в слое 0–50 см, МПа (H), содержания агрономически ценных агрегатов 0,25–10 мм, % в слое почвы 0–30 см (S) и количества сорных растений шт/м² (Z), и анализ предварительно заданных нормативных значений, после чего вычисляют комплексный показатель плодородия $K_{\text{кп}}$ по формуле:

$$K_{\text{кп}} = \gamma_1 * \frac{W - W_{\text{min accept}}}{W_{\text{max}} - W_{\text{min accept}}} + \gamma_2 * \frac{D_{\text{max accept}} - D}{D_{\text{max}} - D_{\text{max accept}}} + \gamma_3 * \frac{H_{\text{max accept}} - H}{H_{\text{max}} - H_{\text{max accept}}} + \gamma_4 * \frac{S - S_{\text{max accept}}}{S_{\text{max}} - S_{\text{max accept}}} + \gamma_5 * \frac{Z_{\text{max accept}} - Z}{Z_{\text{max}} - Z_{\text{max accept}}} \quad (1)$$

Для анализа значений показателя интегрального коэффициента комплексного плодородия ($K_{кп}$), разработанного с учётом положений физики почв и агроэкологических параметров, предложена следующая категоризация состояния агросистем:

- $K_{кп} \geq 0,6$ – зона высокого плодородия и экологической стабильности. Данный диапазон соответствует оптимальному физическому состоянию почв, характеризующемуся благоприятными показателями структурно-агрегатного состава, условий для хорошей водопроницаемости и накопления влаги. Характеризуется высокой эрозионной устойчивостью;

- $0,4 \leq K_{кп} < 0,6$ – зона умеренного плодородия и повышенных рисков. В этом диапазоне наблюдается начальная стадия деградации физического состояния почвы. Основной задачей в данном диапазоне значений ($K_{кп}$) является выбор агротехнологий, направленных на сохранение почвенного плодородия и предотвращение уплотнения;

- $K_{кп} < 0,4$ – зона низкого плодородия и выраженной деградации. Низкие значения коэффициента являются индикатором критического ухудшения агрофизических параметров: переуплотнения, снижения пористости, ухудшения водопроницаемости и потери агрономически ценных агрегатов. Это ведёт к дисбалансу водного режима, усилению эрозионных процессов и резкому падению продуктивности агроценозов.

2. Геоинформационное картографирование и пространственный анализ. Методами интерполяции построены серии тематических картосхем, визуализирующих пространственное распределение ключевых параметров состояния почв.

3. Метод экспертных оценок и синтеза. На заключительном этапе проведена интегральная оценка и разработана схема зонирования территории по экологическому статусу и коэффициенту комплексного плодородия ($K_{кп}$) почв (рисунок).

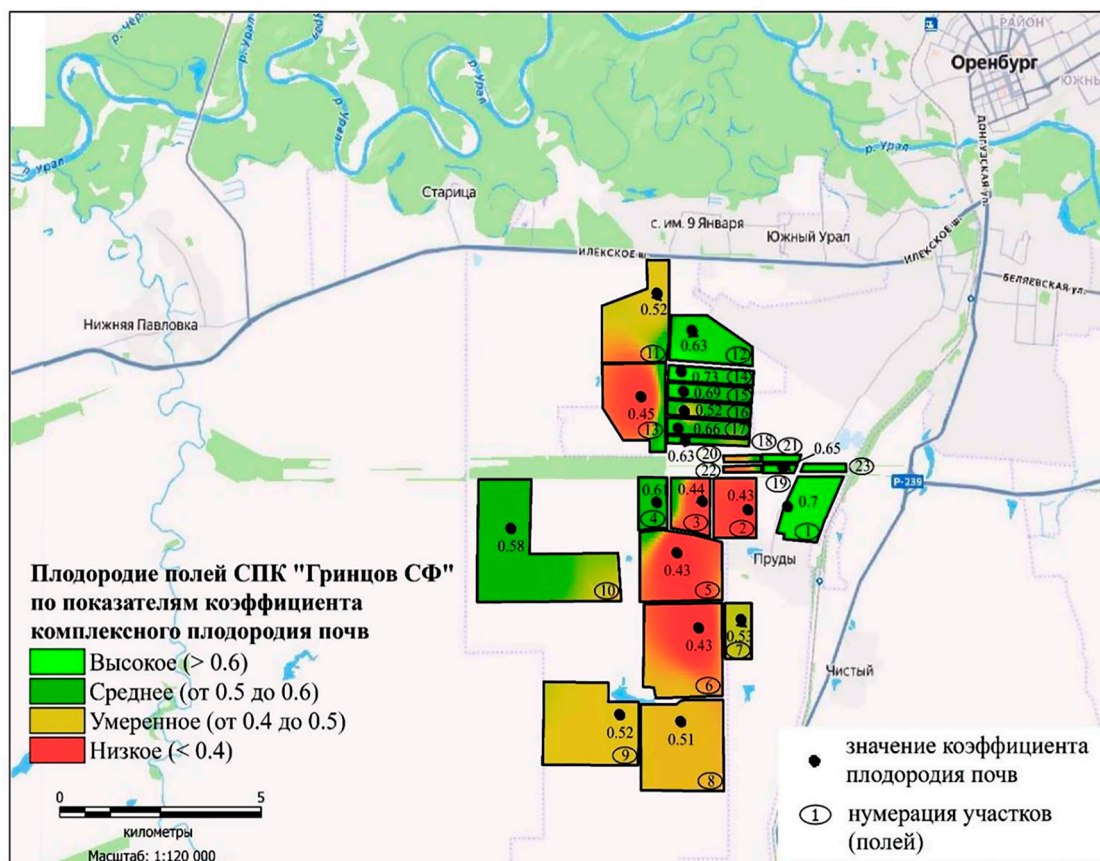
Результаты исследования и их обсуждение

Для выявления пространственных закономерностей и взаимосвязей применен кластерный анализ, позволивший выделить типологические группы полей (ареалы землепользования) со схожим экологическим статусом на основе рассчитанных значений ($K_{кп}$) и ключевых почвенных показателей. Статистическая достоверность кластеров была подтверждена дисперсионным анализом ($p < 0,05$). В результате были идентифицированы четыре устойчивые группы, характеристика которых представлена в таблице. Выделенные группы отражают градации геоэкологического состояния почв, обусловленные различным уровнем и характером антропогенной нагрузки, что позволяет рассматривать их в качестве основы для пространственной дифференциации территории на ареалы землепользования.

Значения коэффициента комплексного плодородия ($K_{кп}$) почв и сопутствующих параметров для типологических групп агроландшафтов (ареалы землепользования)

Показатель	Типологические группы агроландшафтов			
	Антропогенно-деградирующий	Антропогенно-восстановительный	Антропогенно-стабильный	Адаптивно-ландшафтный
Запас влаги в почве, мм	18-26	80-112	55-65	98-105
Твердость почвы (сопротивление проникновению), МПа	6,03-6,52	2,32-5,07	4,98-5,83	1,68-1,98
Коэффициент комплексного плодородия почвы	0,43-0,44	0,58-0,70	0,51-0,56	0,69-0,73
Количество рудеральных видов растений, шт./м ²	33,2-35,8	7,8-17,2	26,2-31,0	6,3-8,0
Содержание гумуса в почве, %	3,2	2,8-3,9	3,3-4,0	3,7
Содержание агрономически ценных агрегатов в почве, %	67,2	69,4	67,0-71,1	67,0
Объемная масса почвы, г/см ³	1,20-1,21	1,16-1,18	1,16-1,19	1,15

Примечание: составлено авторами на основе полученных данных в ходе исследования.



*Геоэкологическое зонирование территории по значениям коэффициента комплексного плодородия ($K_{кл}$) почв
Примечание: составлено авторами по результатам данного исследования*

Выявленные структурно-функциональные зависимости отражают характер ответных реакций почвенной системы на антропогенную нагрузку и служат индикаторами её устойчивости. Полученные временные ряды служат основой для прогнозирования состояния почвенного покрова и обоснования адаптивных стратегий землепользования, направленных на сохранение экологических функций почв.

Кластерный анализ и последующая верификация методами описательной статистики позволили дифференцировать всю совокупность полей на четыре статистически достоверные ($p < 0,05$) типологические группы (рис.).

Выделенные кластеры отражают не только текущий уровень почвенного плодородия, но и различную степень антропогенной трансформации агроландшафта, а также их потенциальную способность к самовосстановлению. Пространственная дифференциация полученных групп позволяет рассматривать их как самостоятельные

геоэкологические ареалы, различающиеся по характеру и интенсивности природно-антропогенных процессов:

- группа I. Антропогенно-деградирующие угодья (поля 2, 3, 5, 6, 13). Данный кластер характеризуется критическими значениями по комплексу показателей. Средний запас влаги в почве составляет $21,2 \pm 3,5$ мм, что свидетельствует о нарушении водного режима. Объемная масса почвы ($1,21 \pm 0,01$ г/см³) и твердость почвы ($6,27 \pm 0,24$ МПа) достигают максимумов, указывая на выраженное физическое переуплотнение, соответствующее III-IV стадии пастбищной дигрессии [10]. Фитосанитарное состояние оценивается как неудовлетворительное (количество рудеральных видов растений $34,6 \pm 1,3$ шт./м²). Интегральный коэффициент плодородия минимален ($0,44 \pm 0,01$);

- группа II. Антропогенно-стабильная пашня (поля 7, 8, 9, 11). Угодья этой группы демонстрируют условно равновесное состояние. Запас влаги в почве $57,2 \pm 1,9$ мм, твердость почвы $5,62 \pm 0,09$ МПа. Относительно

стабильное содержание гумуса ($3,5 \pm 0,3\%$) и количество сорняков ($26,3 \pm 0,4$ шт./м²) позволяет классифицировать данную систему как устойчивую при текущем уровне антропогенной нагрузки. Участки соответствуют чернозёму южному плакорному, находящемуся под посевами яровых зерновых и характеризующемуся относительно равновесным водным режимом [11];

- группа III. Антропогенно-восстановительный режим землепользования (поля 1, 10, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22). Кластер объединяет участки с признаками активного почвообразования и восстановления экологических функций. Наблюдается статистически значимое улучшение всех параметров: максимальный запас влаги в почве ($95,3 \pm 13,1$ мм), оптимальный показатель объемной массы почвы ($1,16 \pm 0,01$ г/см³) и твердости почвы ($3,20 \pm 1,07$ МПа.), минимальная засоренность ($9,0 \pm 2,7$ шт./м²). Коэффициент плодородия достигает высоких значений ($0,65 \pm 0,05$). Особенно показательна динамика на полях, находящихся в залежи шесть лет (1, 10, 16, 17), что эмпирически подтверждает восстановление чернозёмных почв, улучшение их структуры и водопроницаемости после снятия антропогенной нагрузки. Выявленная эффективность залежей согласуется с наблюдениями о формировании вторичных степей на постагрогенных землях [12];

- группа IV. Адаптивно-ландшафтная система землепользования (поля 4, 12, 14, 15.). Данный кластер демонстрирует оптимальные агрофизические показатели: запас продуктивной влаги в почве ($101,5 \pm 4,9$ мм), оптимальную твёрдость почвы ($1,81 \pm 0,18$ МПа) и высокий коэффициент плодородия ($0,69 \pm 0,05$). Система является наиболее стабильной в среднесрочной перспективе. Высокие текущие показатели достигнуты за счет технологического типа воздействия (глубокое рыхление без оборота пласта с сохранением пожнивных остатков на поверхности почвы), которое поддерживает хорошее физическое состояние почвы. Участки расположены на плакорных чернозёмах, применяемые щадящие обработки соответствуют принципам природоподобных технологий и рекомендациям по концентрации ресурсов на элитных пахотных землях [13]. Но важно учитывать и контролировать дальнейшее развитие почвенных процессов для избегания интенсификации процессов минерализации органического вещества [14; 15].

Выводы

Методами многомерной статистики впервые для территории исследования осуществлена объективная классификация, позволившая выделить ($p < 0,05$) типологические группы (ареалы землепользования), обусловленные режимом антропогенной нагрузки для принятия взвешенных решений в рамках устойчивого землепользования и в условиях нарастающей аридизации климата. Классификация детализирована с учётом региональных особенностей почвенного покрова и структуры. Установлено, что наиболее деградированные состояния ассоциированы с комплексами солонцеватых слабосмытых почв.

1. Средствами ГИС-аналитики схематически отражено пространственное расположение полей, формирующих ареалы с определенными видами антропогенной нагрузки (деградации и восстановительных процессов почвенной системы), в условиях исторически сложившейся организации землепользования. Предложенная схема геоэкологического зонирования на основе коэффициента комплексного плодородия ($K_{\text{кп}}$) позволяет объективно картографировать малопродуктивные участки.

2. Установлена фундаментальная роль физического уплотнения почвы в процессах деградации. Наиболее значимой является сильная обратная корреляция между твердостью почвы и запасом продуктивной влаги ($r = -0,87$) и прямая связь с количеством рудеральных видов растений ($r = +0,79$). Данный результат подтверждает, что механическое и другое уплотнение почвы является основным фактором деградации, запускающим каскад негативных процессов. Выявленная зависимость особенно критична для солонцовых и солонцеватых комплексов, где высокая плотность сложения изначально лимитирует продуктивный запас влаги и усиливает зависимость агроценозов от засух.

3. Подтверждена высокая агроэкологическая эффективность восстановительных режимов, в частности длительной залежи, что подтверждается статистически значимым улучшением комплекса почвенных физических свойств. Полученные данные ($K_{\text{кп}} = 0,65$ после 6 лет залежи) служат количественным подтверждением эффективности консервации деградированных земель и согласуются с концепцией формирования вторичных степей на постагрогенных территориях.

4. Разработана и научно обоснована схема геоэкологического зонирования территории, представляющая собой практический инструмент для планирования агротехнологических приемов. Проведенное исследование является реализацией принципов адаптивно-ландшафтного подхода и адаптивно-стратегического планирования для сельскохозяйственного предприятия. Результаты подтверждают, что пространственно-дифференцированное управление, основанное на комплексной геоэкологической оценке и соотнесенное с региональной агроэкологической группировкой земель, есть необходимое условие для преодоления деградации и перехода к устойчивому землепользованию в условиях нарастающей аридизации климата.

Список литературы

1. Добровольский Г. В., Никитин Е. Д. Экология почв. Учение об экологических функциях почв: учебник. 2-е изд., уточн. и доп. М.: Издательство Московского университета, 2012. 412 с. ISBN: 978-5-211-06211-5.
2. Куст Г. С., Андреева О. В., Зонн И. С. Деградация земель, опустынивание и устойчивое землепользование: концепции и терминология / под редакцией Г. С. Куста; Институт географии РАН, Научно-координационный центр по борьбе с опустыниванием и смягчению последствий засухи имени Н. Ф. Глазовского. М.: МАКС Пресс, 2024. 205 с. ISBN: 978-5-317-07154-7.
3. Lal R. Soil erosion and the global carbon budget // *Environment International*. 2003. Vol. 29. № 4. P. 437-450. DOI: 10.1016/S0160-4120(02)00192-7. EDN: MBQQYZ.
4. Montanarella L., Pennock D. J., McKenzie N., Badraoui M., Chude V., Baptista I. World's Soils Are under Threat // *Soil* 2016. Vol. 2. P. 79-82. URL: <https://www.researchgate.net/publication/296396342> (дата обращения: 02.03.2026).
5. Гулянов Ю. А., Чибилёв А. А. (мл), Чибилёв А. А., Левыкин С. В. Проблемы адаптации степного землепользования к антропогенным и климатическим изменениям (на примере Оренбургской области) // *Известия РАН. Серия географическая*. 2022. № 1. С. 28-40. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47807138> (дата обращения: 21.02.2026). DOI: 10.31857/S258755662201006X.
6. Махотлова М. Ш., Хашукаева А. А., Бегидов А. Р., Мизов И. М., Кармокова Д. Г., Гуппоева Д. С. Экологическая оценка современного состояния агроэкосистем // *International Agricultural Journal*. 2023. № 1. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50337320> (дата обращения: 02.03.2026). DOI: 10.55186/25876740_2023_7_1_30. EDN: UGMBGW.
7. Кирюшин В. И., Дубачинская Н. Н. Проблема освоения адаптивно-ландшафтных систем земледелия в Оренбургской области // *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. 2020. № 6. С. 9-14. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44384981> (дата обращения: 15.03.2026). DOI: 10.37670/2073-0853-2020-86-6-9-14. EDN: VOLKVD.
8. Chotte J. L., Aynekulu E., Cowie A., Campbell E., Vlek P., Lal R., Kapović-Solomun M., von Maltitz G., Kust G., Barger N., Vargas R., Gastrow S. Realising the Carbon Benefits of Sustainable Land Management Practices: Guidelines for Estimation of Soil Organic Carbon in the Context of Land Degradation Neutrality Planning and Monitoring. A report of the Science-Policy Interface. UNCCD, Bonn, Germany, 2019. 108 p. URL: https://www.researchgate.net/publication/335368368_Realising_the_Carbon_Benefits_of_Sustainable_Land_Management_Practices_Guidelines_for_Estimation_of_Soil_Organic_Carbon_in_the_Context_of_Land_Degradation_Neutrality_Planning_and_Monitoring. DOI: 10.13140/RG.2.2.17098.52167.
9. Антонов А. В. Системный анализ: учеб. для студентов вузов, обучающихся по направлению «Информатика и вычислительная техника» и специальности «Автоматизированные системы обработки информации и управления» М.: Высшая школа, 2004. 451 с. ISBN: 5-06-004862-4.
10. Черников В. А., Алексахин Р. М., Голубев А. В. Агроэкология. М.: Колос, 2000. 536 с. ISBN: 5-10-003269-3.
11. Дубачинская Н. Н., Верещагина А. С. Зависимость продуктивного запаса влаги от водно-физических свойств комплексных солонцовых почв в условиях степной зоны Приуралья // *Norwegian Journal of development of the International Science*. 2019. № 3-2 (28). С. 5-9. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37205989> (дата обращения: 15.03.2026). EDN: ZBIXOP.
12. Телеснина В. М., Курганова И. Н., Лопес Де Геренно В. О., Овсепян Л. А., Личко В. И., Ермолаев А. М., Мирин Д. М. Динамика свойств почв и состава растительности в ходе постагрогенного развития в разных биоклиматических зонах // *Почвоведение*. 2017. № 12. С. 1514-1534 (дата обращения: 15.03.2026). DOI: 10.7868/S0032180X17120115. EDN: ZWLVRN.
13. Чибилёв А. А., Гулянов Ю. А., Левыкин С. В. Новационные природоподобные технологии степного землепользования и природные предпосылки к их разработке. Барнаул: Изд-во Алтайского ун-та, 2023. С. 72. ISBN: 978-5-7904-2797-8.
14. Нестеренко Ю. М., Соломатин Н. В. Эффективность использования водных ресурсов и почв на Южном Урале // *Бюллетень Оренбургского научного центра УрО РАН*. 2019. № 1. С. 8. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38187621> (дата обращения: 19.03.2026). EDN: KMGSJY.
15. Тулина А. С. Влияние температуры, влажности и внесения соломы на динамику минерализации органического вещества и почвенные пулы углерода и азота // *Агрохимия*. 2019. № 3. С. 3-18. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36953839> (дата обращения: 19.03.2026). DOI: 10.1134/S0002188119030141. EDN: SRFCQZ.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

Финансирование: Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования.

Financing: The research was performed without external funding.