

УДК: 631.45: 421

Нейросетевой прогноз содержания гумуса в черноземах обыкновенных слабоэродированных Ростовской области

Гаевая Э.А., Безуглова О.С.

ФГБНУ Федеральный Ростовский аграрный научный центр

Аннотация

В статье представлен прогноз содержания гумуса в черноземах обыкновенных слабоэродированных Ростовской области на долгосрочную перспективу, составленный на основе автоматизированных нейронных сетей. Исследования проводили в длительном опыте в 1986–2022 гг. по изучению севооборотов, способов обработки почвы и уровней применения удобрений на склоне балки Большой Лог крутизной до 3,5–4° Аксайского района Ростовской области. Составленный прогноз выявил снижение содержания гумуса в последующие сто лет без внесения удобрений. Внесение средних доз минеральных удобрений позволяет поддерживать содержание гумуса на исходном уровне в севооборотах с различной долей многолетних трав, а в повышенных дозах – обеспечивает расширенное воспроизводство плодородия почвы.

Ключевые слова: АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ НЕЙРОННЫЕ СЕТИ, ГУМУС, ПРОГНОЗ, ПОЧВА, СЕВООБОРОТЫ, УДОБРЕНИЯ

Введение

Эрозионные потери почвы на сельскохозяйственных полях в Российской Федерации и Ростовской области остаются одним из главных источников потерь плодородия почвы, в частности содержания гумуса [1, 2]. На территории Российской Федерации среди деградационных явлений на водную эрозию приходится 15,5 %, на дефляцию – 8,8 %. В

Ростовской области водной эрозии подвержены 48,9 %, ветровой – 22,5 % [3]. Основными свойствами, определяющими плодородие сельскохозяйственных территорий, являются содержание и запасы гумуса [4, 5]. Изменения организационно-экономических условий ведения аграрного производства в последние 30 лет коренным образом изменили условия формирования баланса органического вещества, которые приводят к потере 12–23 % запасов гумуса пахотного слоя почв, а также и ухудшению его качественных характеристик [6–8].

Математическое моделирование на основе искусственных нейронных сетей, по мнению ряда отечественных и зарубежных исследователей, позволяет решать такие задачи, как прогнозирование динамики временных рядов, характерные для моделирования, в том числе, урожайности сельскохозяйственных культур, процессов деградации плодородия, потери гумуса и основных элементов питания [9–16]. Существующие модели прогнозирования запасов гумуса в почве не в достаточной степени отражают процессы формирования и гумусонакопления в системе «почва – растение» [17, 18].

Актуальность темы исследования связана с проблемой повышения плодородия почвы как основного ресурса сельскохозяйственного производства. Поэтому составление долгосрочных прогнозов плодородия земель сельскохозяйственного назначения для производства сельскохозяйственной продукции является актуальной задачей настоящего исследования.

Цель исследования – составление долговременного прогноза содержания гумуса в черноземах обыкновенных слабоэродированных Ростовской области на основе автоматизированных нейронных сетей.

Материалы и методы

Исследования были проведены в 1986–2022 гг. в длительном полевом эксперименте по изучению севооборотов, способов 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. Опыт зарегистрирован в Российской Географической сети длительных опытов с удобрениями (аттестат № 169).

Почвенный покров участка представлен агрочерноземом обыкновенным

карбонатным среднесмытым среднемощным малогумусным тяжелосуглинистым на лессовидном суглинке [19]. Согласно международной классификации WRB почва диагностируется как Calcic Chernozem (Loamic, Pachic) [20].

PU — 0–25 см. Свежий, темно-серый, глыбисто-комковато-порошистый, тяжелосуглинистый, рыхлый, неоднородный по плотности, тонкопористый, тонкотрещиноватый, корешковатый, переход заметный по плотности.

AU — 25–55 см. Свежий, темно-серый, зернисто-порошисто-комковатый, тяжелосуглинистый. Уплотнен, тонкопористый, тонкотрещиноватый, корешковатый. Переход заметный.

AU 1с — 55–75 см. Свежий, темно-серый с бурым оттенком, порошисто-комковато-ореховатый, тяжелосуглинистый Уплотнен, тонкопористый, тонкотрещиноватый. Единичные корни, карбонатная плесень. Переход заметный по окраске и вскипанию.

BCA 1с — 75–90 см. Свежий, темно-бурый с серыми пятнами, порошисто-ореховатый, тяжелосуглинистый, уплотненный, тонкопористый, тонкотрещиноватый, карбонатные прожилки, червороины, единичные корни, переход заметный.

BCA 1с — 90–130 см. Свежий, неоднородный по окраске: бурый с затеками гумуса и белесыми пятнами единичной белоглазки, порошисто-комковато-ореховатый, тяжелосуглинистый, уплотнен, тонкопористый, тонкотрещиноватый, червороины, карбонатные прожилки, переход постепенный.

C са — 110–140/ дно. Карбонатный лессовидный тяжелый суглинок.

Объектами исследования служила почва в севооборотах различной конструкции: Севооборот «А»: чистый пар 20 %, колосовые культуры – 60 %, пропашные – 20 %; Севооборот «Б»: зернобобовые культуры – 20 %, колосовые культуры – 40 %, пропашные – 20 %, многолетние травы – 20 %; Севооборот «В»: колосовые культуры – 40 %, пропашные – 20 %, многолетние травы – 40 %. Удобрения вносили в двух дозах: в средней 5 т навоза +N₄₆P₃₀K₃₀ (106 кг д.в. на 1 га севооборотной площади) и повышенной – 8 т навоза + N₈₄P₃₀K₄₈ (162 кг д.в. на 1 га севооборотной площади). С 2013 г. из системы удобрений был исключен навоз. Контролем служил вариант без внесения удобрений. Использовали две системы обработки почвы: чизельную и отвальную под предшествующую культуру. Почву для анализа отбирали на закрепленных площадках в слое 0–30 см, гумус определяли по методу Тюрина, в модификации ЦИНАО, ГОСТ 26213-2021 [21].

Для составления долгосрочных моделей прогноза использовали автоматизированные нейронные сети (АНС) в программе STATISTICA. Тип сети при использовании АНС – многослойный персептрон (MLP). Количество входных нейронов равнялось длине ряда данных, используемых для составления прогноза. Размер подвыборок равнялся: обучающей – 70 %, контрольной – 30 %. Сложность нейронной сети определялась количеством нейронов на внутреннем слое. Число скрытых элементов на внутреннем слое равнялось: минимальных скрытых нейронов – 2, максимальных скрытых нейронов – 12. Число обучаемых АНС составляло 50 шт., а сохраняемых сетей АНС – 5 шт. Из построенных пяти АНС были выбраны три сети, которые имели наибольшую обучающую и контрольную производительность и наименьшую ошибку [22].

Результаты исследования и обсуждение

В последние десятилетия в результате деградации черноземов обыкновенных ухудшилась ситуация с содержанием гумуса в агрочерноземах как в Ростовской области, так и в целом по России. Поэтому нами сделан долгосрочный прогноз динамики содержания гумуса в черноземах среднеэродированных с использованием автоматизированных нейронных сетей (АНС) до 2122 года с целью прогнозирования ситуации по плодородию на перспективу. Для составления прогноза был использован временной ряд содержания гумуса в слое почвы 0–30 см с 1986 по 2022 г., отбирали по три АНС с наилучшими статистическими параметрами.

Исходное содержание гумуса при закладке опыта составляло 3,80–3,83 %, в течение семи ротаций севооборотов его содержание в различной степени изменилось в результате внесения органоминеральных удобрений, процессов деградации, а также выноса питательных веществ с урожаем. Систематическое возделывание сельскохозяйственных культур без внесения удобрений привело к снижению содержания гумуса на 2,1–9,4 отн. % с большими значениями в севообороте «А» с 20 % чистого пара. Внесение удобрений в средних дозах незначительно снизило содержание гумуса в севообороте «А» с чистым паром на 4,4–7,3 %, в севообороте «Б» с 20 % многолетних трав – на 1,6–2,1 %, а в севообороте «В» с 40 % многолетних трав содержание гумуса практически не изменилось (табл. 1).

Таблица 1. Фактические и предсказанные значения до 2122 г. содержания гумуса в черноземах обыкновенных в севооборотах различных конструкций, %

Севооборот	Уровень	Способ обработки почвы	Фактические значения		Предсказанные значения (min/max) / (номер нейронной сети)			Среднее (M)
			1986 г.	2022 г.	1 MLP	2 MLP	3 MLP	
А	0	Чиз.	3,83	3,47	3,57-3,58	3,57-3,58	3,57-3,57	3,65
		Отв.	3,83	3,46	3,60-3,70	3,60-3,71	3,60-3,71	3,64
	1	Чиз.	3,83	3,66	3,65-3,67	3,65-3,67	3,65-3,67	3,72
		Отв.	3,83	3,55	3,62-3,64	3,62-3,66	3,63-3,64	3,70
	2	Чиз.	3,83	3,83	3,72-3,73	3,72-3,73	3,72-3,73	3,77
		Отв.	3,83	3,86	3,69-3,72	3,71-3,72	3,69-3,71	3,75
Б	0	Чиз.	3,82	3,61	3,56-3,58	3,56-3,58	3,56-3,58	3,71
		Отв.	3,82	3,56	3,56-3,67	3,58-3,67	3,58-3,68	3,69
	1	Чиз.	3,82	3,76	3,77-3,79	3,77-3,79	3,77-3,79	3,81
		Отв.	3,82	3,74	3,75-3,80	3,75-3,79	3,75-3,80	3,80
	2	Чиз.	3,82	3,93	3,83-3,90	3,83-3,90	3,83-3,90	3,88
		Отв.	3,82	3,88	3,83-3,91	3,83-3,91	3,83-3,91	3,87
В	0	Чиз.	3,80	3,72	3,61-3,70	3,60-3,71	3,60-3,72	3,72
		Отв.	3,80	3,65	3,60-3,79	3,61-3,79	3,60-3,80	3,70
	1	Чиз.	3,80	3,92	3,97-4,07	3,97-4,09	3,97-4,07	3,97
		Отв.	3,80	3,84	3,84-4,07	3,85-4,07	3,84-4,07	3,95
	2	Чиз.	3,80	3,98	4,08-4,10	4,08-4,10	4,08-4,12	4,02
		Отв.	3,80	3,97	4,07-4,10	4,06-4,10	4,07-4,10	4,01

Внесение удобрений в течение семи ротаций севооборотов в повышенных дозах в севообороте «А» с чистым паром и в севообороте «Б» с 20 % многолетних трав содержание гумуса было на исходном уровне, а в севообороте с 40 % многолетних трав отмечена положительная динамика в его накопления (+4,5–4,7 %).

Составленный нейросетевой прогноз динамики гумуса подтверждает вышеописанную тенденцию накопления или потери гумуса в последующие сто лет. Во всех севооборотах без внесения удобрений фактическое содержание гумуса к 2022 г. снизилось с 3,80–3,83 до 3,46–3,72 %. Предсказанные значения до 2122 г. были несколько выше фактических и изменялись в пределах от 3,57 до 3,72 %. По-видимому, в содержании гумуса устанавливается некоторое равновесие, ниже которого его содержание снизиться не может. Пашня производит ровно столько продукции, сколько в ней содержится питательных веществ, в частности гумуса. Количество поступающих в почву растительных остатков эквивалентно количеству произведенной продукции, и в определенный момент времени наступает равновесие между выносом и поступлением питательных элементов. В этой

ситуации без дополнительного поступления элементов питания (с удобрениями) получить большую урожайность сельскохозяйственной продукции невозможно.

На рис. 1 представлен временной ряд развития сценария динамики гумуса до 2122 года, из которого видно, что при сохраняющихся условиях (климатических, агротехнологических и др.) в начале периода наблюдений отмечаются незначительные колебания его содержания при внесении средних доз удобрений, а затем устанавливается равновесие (3,72 %). Аналогичная закономерность отмечена при внесении повышенных доз удобрений в севообороте «А», содержание гумуса снизилось до 3,77 %. Севооборот «А», в состав которого входит 20 % чистого пара, наиболее подвержен эрозионным процессам, а потери почвы и питательных веществ наибольшие [11].

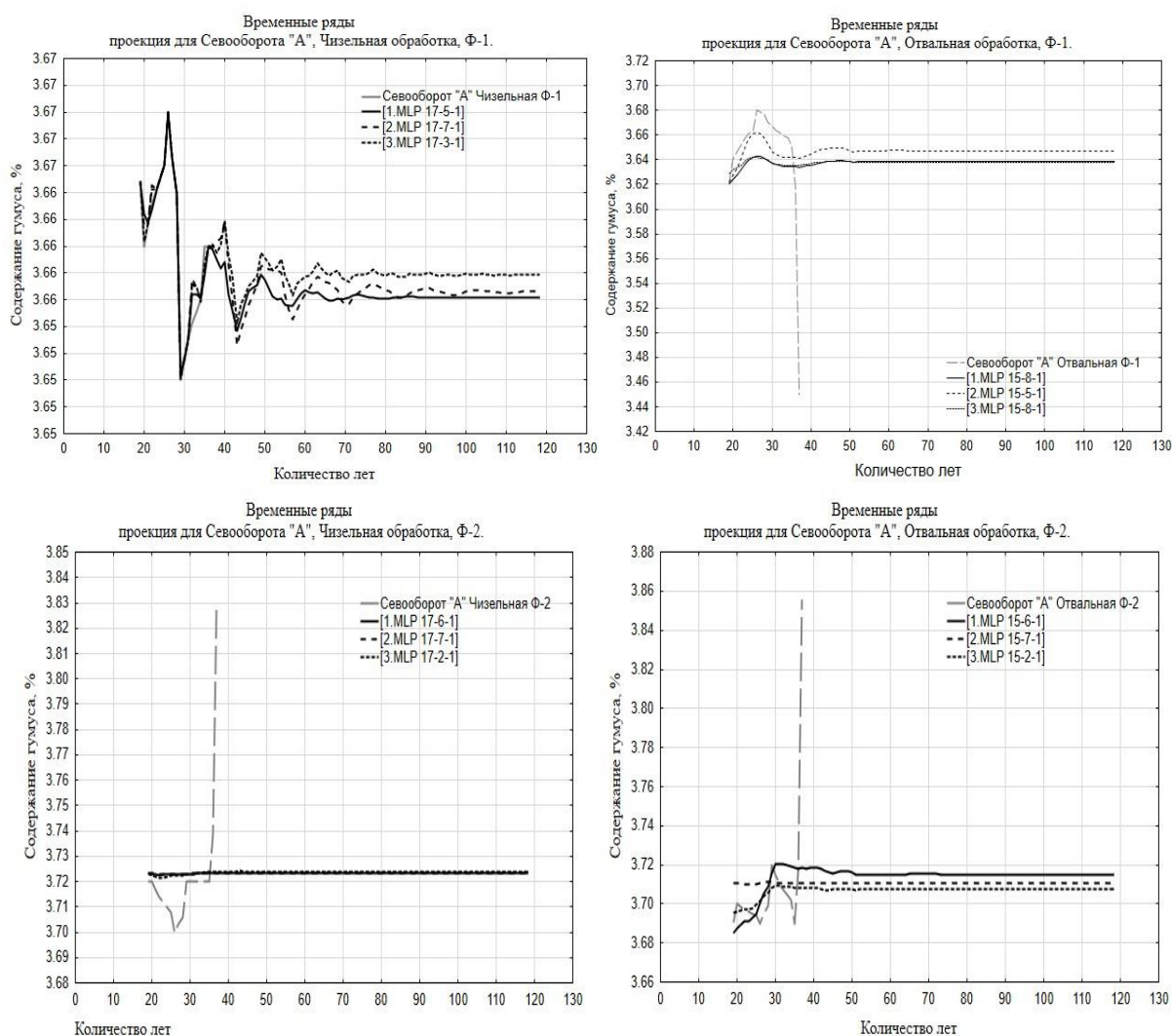
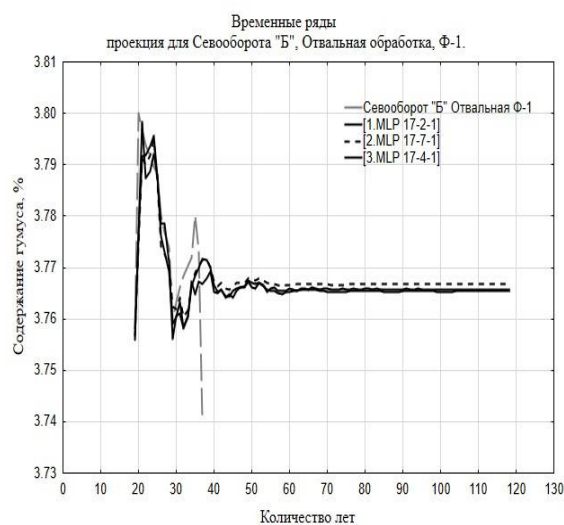
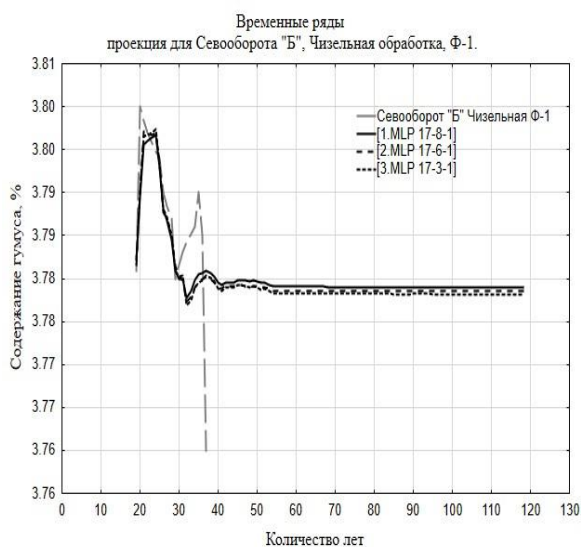


Рис. 1. Проекция временного ряда до 2122 года содержания гумуса в черноземах обыкновенных в севообороте «А», %.

Колебания в содержании гумуса также могут быть связаны и с изменением в схеме внесения удобрений. Как было отмечено ранее, органические удобрения в виде полуперепревшего навоза были исключены из системы удобрений с 2013 г. В течение ряда лет наблюдалось последствие от внесения навоза, но в последние годы отмечена тенденция снижения гумусированности при внесении средних и повышенных доз удобрений. Поэтому устанавливается равновесие, при котором количество получаемой продукции с единицы площади пропорционально плодородию, и без дополнительного количества вносимых удобрений увеличить продуктивность пашни невозможно.

В зависимости от способа обработки почвы разница в содержании гумуса ничтожно мала и не превышает ошибки опыта (0,01–0,03 %).

В севообороте «Б» с 20 % многолетних трав в варианте естественного плодородия предсказанные значения содержания гумуса в почве с помощью АНС были практически одинаковыми (3,56–3,68 %) с фактическими значениями (3,56–3,61 %) (рис. 2). При внесении средних и повышенных доз удобрений в этом же севообороте отмечена тенденция сохранения содержания гумуса на исходном уровне. Фактические значения при внесении средних и повышенных доз удобрений составляли 3,74–3,76 и 3,88–3,93 %, а полученные – 3,75–3,80 и 3,83–3,91 %, что подтверждает тенденцию к поддержанию плодородия на исходном уровне.



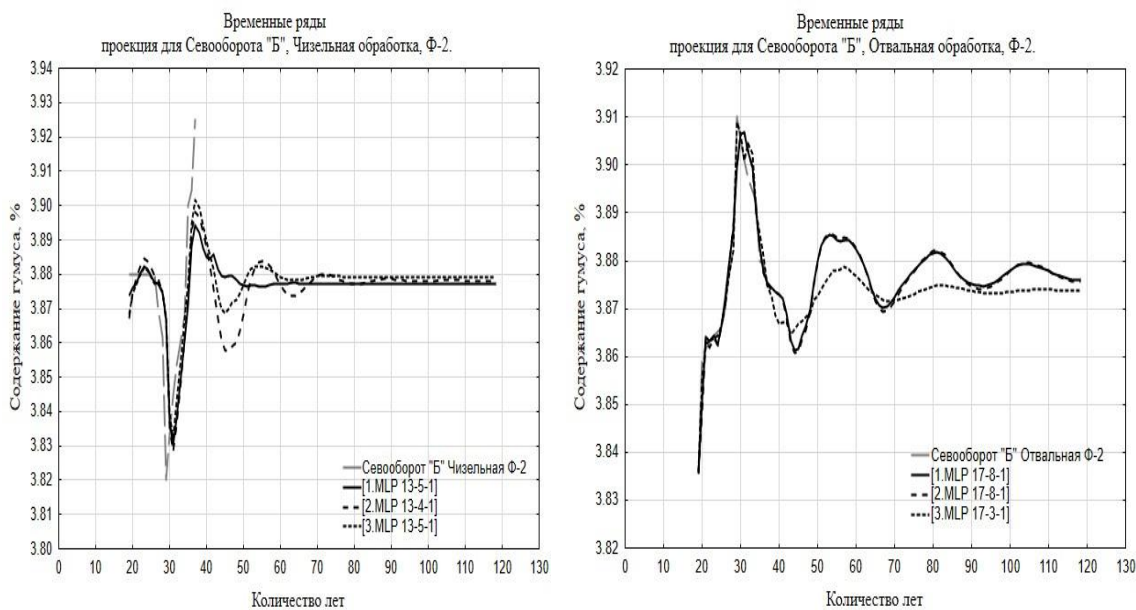
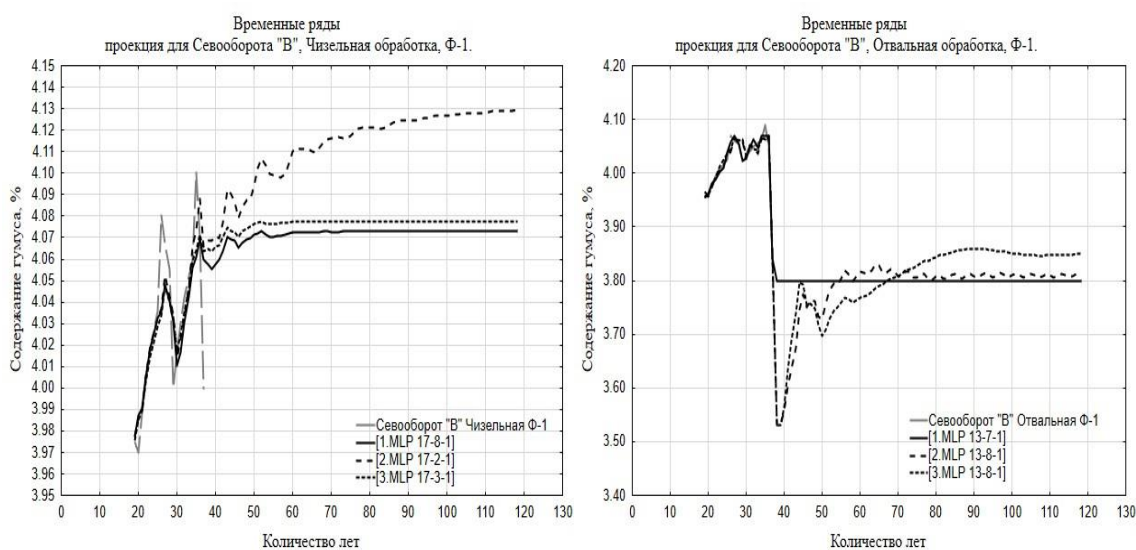


Рис. 2. Проекция временного ряда до 2122 года содержания гумуса в черноземах обыкновенных в севообороте «Б», %

С увеличением доли многолетних трав до 40 % и внесении средних доз удобрений в севообороте «В» было отмечено сохранение содержания гумуса на исходном уровне. Так, если фактические значения при внесении средних доз удобрений были равны 3,84–3,92 %, то предсказанные колебались в пределах 3,95–3,97 % (рис. 3).



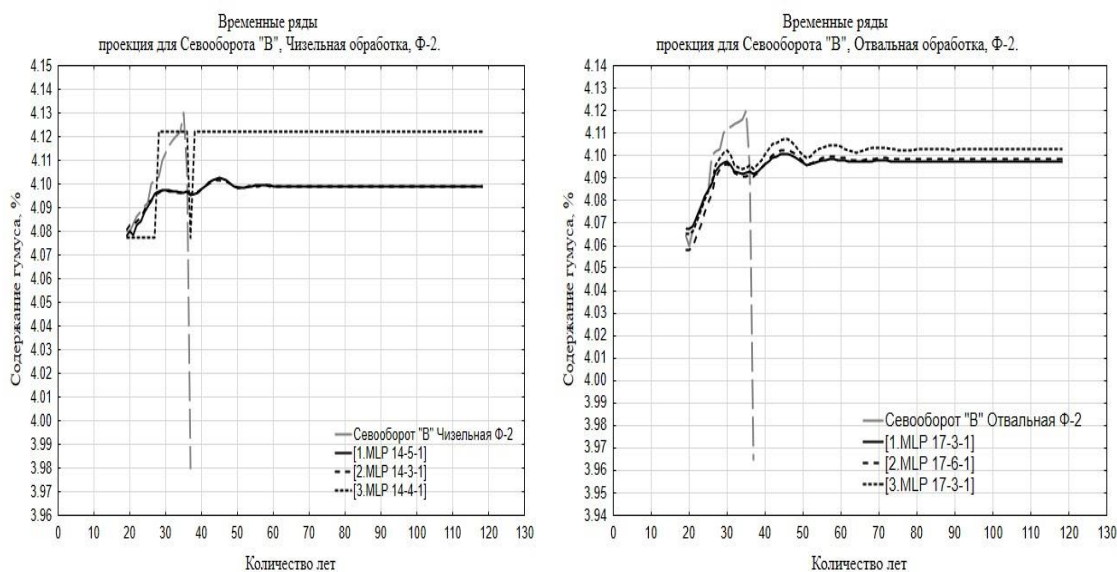


Рис. 3. Проекция временного ряда до 2122 года содержания гумуса в черноземах обыкновенных в севообороте «В», %

Внесение повышенных доз удобрений позволило поддерживать расширенное воспроизводство плодородия в севообороте «В». В результате длительного внесения удобрений в повышенных дозах фактическое содержание гумуса увеличилось с 3,80 % до 3,97–3,98 %. Предсказанные значения оказались несколько более высокими, чем фактические, и колебания гумуса между минимальными и максимальными значениями были равны 4,07–4,12 % на «2» уровне применения удобрений, в среднем (4,02 %). Севооборот «В» с удвоенным по площади полем многолетних трав является почвозащитным и процессы деградации в нем наименьшие. Многолетние травы, в состав которых входит бобовый компонент (эспарцет, люцерна), являются хорошими азотфиксаторами и вместе с листовым опадом обогащают почву азотом. Предотвращение стока и смыва за счет наличия в структуре севооборота 40 % многолетних трав, являющихся хорошими азотфиксаторами, придают этому севообороту почвозащитные свойства [11].

Выводы

Представленный долгосрочный нейросетевой прогноз динамики гумуса в черноземах обыкновенных среднеэродированных подтверждает тенденцию потери гумуса в последующие сто лет во всех севооборотах без внесения удобрений. Внесение средних доз удобрений позволяет поддерживать содержание гумуса на исходном уровне в

севооборотах с долей многолетних трав 20–40 %. При систематическом внесении повышенных доз удобрений в севообороте с долей многолетних трав 40 % прогноз содержания гумуса подтверждает расширенное воспроизводство плодородия почвы.

Список использованных источников:

1. Тронина, Л.О. Подтверждение методики прогнозирования водной эрозии фактическим изменением показателей плодородия агродерново-подзолистой почвы / Л.О. Тронина, И.М. Кудрявцев // Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии. – 2022. – № 4. – С. 16-25. – <https://doi.org/10.26897/0021-342X-2022-4-16-25>.

2. Глобальный климат и почвенный покров России: проявления засухи, меры предупреждения, борьбы, ликвидации последствий и адаптационные мероприятия (сельское и лесное хозяйство) / Р.С.Х. Эдельгериев, А.Л. Иванов, И.М. Донник [и др.]. Национальный доклад / Москва. – 2021. Т. 3. – 700 с.

3. Доклад о состоянии и использовании земель сельскохозяйственного назначения Российской Федерации в 2020 году / Е. В. Фастова, А. Н. Павлюченко, О. А. Григорьев [и др.]. – М.: Российский научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований по инженерно-техническому обеспечению агропромышленного комплекса, 2022. – 384 с.

4. Трофимец, Л.Н. Результаты экспериментальных измерений эрозионных потерь почвы в свально-развальных бороздах и в ручьях, сформировавшихся на сельскохозяйственном поле с выпаханными почвами (бассейн Сухой Орлицы Орловского района Орловской области) / Л.Н. Трофимец, Е.А. Паниди, А.О. Баркалов, А.В. Тарасов // АгроЭкоИнфо. – 2024. – № 4(64). – Режим доступа: http://agroecoinfo.ru/STATYI/2024/4/st_415.pdf <https://doi.org/10.51419/202144415>.

5. Сыщиков, Д.В. Гумусное состояние деградированных почв сельскохозяйственных угодий Донецкой Народной Республики / Д.В. Сыщиков, И.В. Агурова, А.С. Березовский // Экологический Вестник Северного Кавказа. – 2024. – Т. 20, № 2. – С. 113-118.

6. Тарбаев, В.А. Оценка и прогноз условий использования пашни на воспроизводство гумусного состояния чернозёмов обыкновенных Саратовской области / В.А. Тарбаев, В.М. Янюк, И.И. Демакина, Е.Н. Павлова // Московский экономический журнал. – 2023. – Т. 8, № 1. – https://doi.org/10.55186/2413046X_2023_8_1_42.

7. Гумбаров, А.Д. Прогнозирование плодородия почвы агроландшафта до момента реконструкции ПТК / А.Д. Гумбаров, Е.В. Долобешкин // Научная жизнь. – 2019. – Т. 14, № 3(91). – С. 348-357. – <https://doi.org/10.26088/INOV.2019.91.30054>.

8. Стригунов, Ю.В. Аспекты создания и использования баз данных для построения нейросетевых моделей с целью прогнозирования показателей урожайности зерновых культур и оптимизации агротехнологических мероприятий / Ю.В. Стригунов, К.В. Петухов

// Современные проблемы и пути их решения в науке, производстве и образовании. – 2018. – № 6. – С. 39-45.

9. Джаббаров, Н.И. Моделирование и оценка уровня плодородия почвы / Н.И. Джаббаров, А.П. Мишанов, А.В. Добринов, А.П. Савельев // Инженерные технологии и системы. – 2024. – Т. 34, № 3. – С. 407-423. – <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202403.407-423>.

10. Ушкаренко, В.А. Нейронные сети в прогнозировании урожайности сельскохозяйственных культур на основании результатов многофакторных опытов на примере кукурузы сахарной / В.А. Ушкаренко, П.В. Лиховид // Успехи современной науки и образования. – 2017. – Т. 4, № 1. – С. 174-176.

11. Гаевая, Э.А. Прогноз развития процессов деградации на эрозивно опасных склонах черноземов обыкновенных Ростовской области / Э. А. Гаевая, О. С. Безуглова // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. – 2024. – № 2(222). – С. 72-83. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2024-2-72-83>.

12. Сухановский, Ю.П. Математическое моделирование динамики запасов гумуса в черноземе: прогноз и выводы / Ю.П. Сухановский, Н.П. Масютенко, С.И. Санжарова, А.В. Прущик // Достижения науки и техники АПК. – 2009. – № 1. – С. 13-15.

13. Сухановский, Ю.П. Модель для прогнозирования динамики мощности гумусового слоя и запасов гумуса в серых лесных почвах Центрального Черноземья / Ю.П. Сухановский, А.В. Прущик, С.И. Санжарова // Земледелие. – 2017. – № 6. – С. 6-10.

14. Рогачев, А.Ф. Нейро-аналитическое прогнозирование урожайности при программируемом возделывании сельскохозяйственных культур с учетом агротехнологических факторов / А.Ф. Рогачев, Е.В. Мелихова, Е.П. Боровой, И.С. Белоусов // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. – 2023. – № 4(72). – С. 418-427. – <https://doi.org/10.32786/2071-9485-2023-04-42>.

15. Рогачев, А.Ф. Системный анализ и прогнозирование временных рядов урожайности на основе автокорреляционных функций и нейросетевых технологий / А.Ф. Рогачев // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. – 2018. – № 3(51). – С. 309-316.

16. Rukhovich D. A detailed mapping of soil organic matter content in arable land based on the multitemporal soil line coefficients and neural network filtering of big remote sensing data / D.Rukhovich, P. Koroleva, Alexey Rukhovich, Mikhail Komissarov // Geoderma. – 2024. – № 447. – p.116941. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2024.116941>.

17. Лисецкий, Ф.Н. Оценка и прогноз изменений содержания гумуса в степных почвах с использованием геоинформационных и нейротехнологий / Ф.Н. Лисецкий, В.И. Пичура, Д.С. Бреус // Российская сельскохозяйственная наука. – 2017. – № 1. – С. 24-28.

18. Тиньгаев А.В. Математическое моделирование запасов гумуса в почве при использовании органических отходов // Вестник Алтайского государственного аграрного

университета. – 2014. – № 12(122). – С. 60-64.

19. Классификация и диагностика почв СССР. сост. чл.-кор. ВАСХНИЛ В.В. Егоров, проф. В.М. Фридланд, проф. Е.Н. Иванова [и др.]; Почв. ин-т им. В.В. Докучаева. – М.: Колос, 1977. – 223 с.

20. World reference base for soil resources 2014. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports. – №. 106. – FAO, Rome.

21. ГОСТ 26213-2021. Почвы. Методы определения органического вещества. – Дата введения 2022-08-01. – М.: Российский институт стандартизации, 2021. – 8 с.

22. StatSoft, Inc. STATISTICA (Data Analysis Software System), Version 13. 2020. Available online: <https://web.archive.org/web/20131213145004>. / (дата обращения 1 апреля 2025 г.).

Цитирование:

Гаевая Э.А., Безуглова О.С. Нейросетевой прогноз содержания гумуса в черноземах обыкновенных слабоэродированных Ростовской области [Электрон. ресурс] // АгроЭкоИнфо: Электронный научно-производственный журнал. – 2025. – № 2. – Режим доступа: http://agroecoinfo.ru/STATYI/2025/2/st_209.pdf
DOI: <https://doi.org/10.51419/202152209>.