

Безуглова О.С., Гаевая Э.А. Прогноз содержания подвижного фосфора в агрочернозёмах
Ростовской области с использованием автоматизированных нейронных сетей

.....
Электронный научно-производственный журнал
«АгроЭкоИнфо»
=====

УДК: 631.423.3:421.1

**Прогноз содержания подвижного фосфора в агрочернозёмах Ростовской
области с использованием автоматизированных нейронных сетей**

Безуглова О.С., Гаевая Э.А.

ФГБНУ Федеральный Ростовский аграрный научный центр

Аннотация

Составленный прогноз с использованием автоматизированных нейронных сетей выявил снижение содержания подвижного фосфора в черноземе обыкновенном среднеэродированном в вариантах без внесения удобрений. Применение средних доз удобрений в почвозащитных севооборотах с долей многолетних трав от 20 % до 40 % поддерживают фосфорный режим на исходном уровне. Удвоенное по площади поле многолетних трав и применение повышенных доз удобрений позволяют получить расширенное воспроизводство плодородия почвы.

Ключевые слова: АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ НЕЙРОННЫЕ СЕТИ, АГРОЧЕРНОЗЕМЫ, ПОДВИЖНЫЙ ФОСФОР, ПРОГНОЗ, СЕВООБОРОТЫ, СПОСОБЫ ОБРАБОТКИ ПОЧВЫ, УДОБРЕНИЯ

Оценить плодородие земель длительного сельскохозяйственного использования можно по содержанию основных элементов питания, в частности подвижного фосфора, средневзвешенное содержание которого в пахотном слое почв Ростовской области является достаточно объективным индикатором их агроистощения [1].

В целинных черноземах содержание валового фосфора колеблется от 0,22 до 0,24 %, а доступных для растений фосфатов – 25–42 мг/кг. Содержание подвижных форм фосфора в чернозёмах обыкновенных в Приазовской зоне Ростовской области низкое. В пахотном горизонте агрочерноземов фосфатов содержится от 40 до 50 % от общих запасов. Пашня, находящаяся длительное время в землепользовании при условии систематического

внесения фосфорных удобрений, имеет более высокую обеспеченность фосфором по сравнению с целиной, где вынос преобладает над поступлением [2]. Для получения высоких урожаев в пахотном горизонте на плакорных землях подвижных форм фосфатов должно быть от 30 до 40 мг/кг [3]. На эрозионно-опасных землях за счет процессов деградации содержание подвижного фосфора меньше на 20–25 % по сравнению с плакорными [4, 5].

Большое значение в трансформации фосфора имеют почвенные ферменты – фосфатазы, активность которых зависит от температуры и влажности почвы [6]. Благоприятные гидротермические условия, высокая влагообеспеченность, играют большую роль в питании растений. При таких условиях возрастает способность почвы пополнять дефицит растворимых форм фосфора из подпахотного горизонта. Длительное систематическое использование удобрений позволяет поддерживать фосфатный режим почвы на высоком уровне [7]. На каждые 100 кг внесенного с удобрениями фосфора содержание подвижных форм в почве повышается на 2,7 мг/кг [8].

В почвах Ростовской области в конце прошлого столетия отмечался рост содержания подвижного фосфора в почве в результате систематического внесения органических и минеральных удобрений. По данным ФГБУ ГЦАС «Ростовский» средние дозы внесения фосфорных удобрений в действующем веществе на гектар севооборотной площади составляли от 28 до 30 кг, при этом содержание подвижного фосфора в пахотном горизонте в среднем по области было на уровне 25–27 мг/кг. В начале двухтысячных годов отмечена тенденция уменьшения содержания подвижного фосфора в почве до 20 мг/кг, а внесение удобрений сократилось до 1,4 кг/га. За последние два десятилетия внесение фосфорных удобрений остается на уровне 13–17 кг/га, однако, несмотря на рост содержания подвижного фосфора, его уровень не достиг показателей 90-х годов прошлого столетия [9]. Аналогичная динамика снижения подвижного фосфора отмечена и в типичных чернозёмах – до 14,1 кг, в выщелоченных – 15,2, в южных – 16,8, наибольший дефицит по фосфору отмечен в обыкновенных чернозёмах – 18,0 кг [10, 11].

Совместное внесение навоза и минеральных удобрений способствует достоверному увеличению подвижного фосфора в разных регионах страны: в Белгородской области [12–14], в Краснодарском крае [15], Донецкой Народной Республике [16].

Ежегодное увеличение урожайности сельскохозяйственных культур приводит к росту выноса фосфора с урожаем, поэтому нужен систематический мониторинг агрохимических свойств почвы и на его основе разработка научно обоснованных

рекомендаций применения фосфорных удобрений [17]. Для прогнозирования влияния фосфора на урожайность необходимо составлять прогнозы на основе нейронных сетей [18–20]. Использование различных моделей позволяет выбрать оптимальную дозу фосфора для получения максимальной прибавки урожайности от внесения удобрений при различной обеспеченности почвы подвижным фосфором с учетом природно-климатических характеристик [21].

Цель данного исследования – составление долгосрочного нейросетевого прогноза динамики подвижного фосфора в агрочерноземах Приазовской зоны Ростовской области.

Материал и методы

Исследования 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 были проведены в долгосрочном полевом опыте в 1986–2022 гг. Опыт зарегистрирован в Российской Географической сети длительных опытов с удобрениями (аттестат № 169).

Почвенный покров участка представлен черноземом обыкновенным карбонатным среднесмытым среднемощным малогумусным тяжелосуглинистым на лессовидном суглинке [22]. Согласно международной классификации WRB почва диагностируется как *Uralic Chernozem (Loamic, Pachic)* [23]. Мощность $A_{\text{пах}}$ – 25–30 см, $A+B$ – от 60 до 75 см – в зависимости от смывости. Горизонт $A_{\text{пах}}$ имеет глыбисто-комковато-порошистую структуру, $A_{\text{подпах}}$ – зернисто-порошисто-комковатую. Вскипание слабое с 20–30 см, бурное – с 30–50 см (также в зависимости от смывости), прожилки карбонатов – с 60–70 см. На глубине 90–110 см появляется белоглазка.

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 + $N_{46}P_{30}K_{30}$ – фон «1» (106 кг д.в. на 1 га севооборотной площади) и повышенной – 8 т навоза + $N_{84}P_{30}K_{48}$ – фон «2» (162 кг д.в. на 1 га севооборотной площади). Контролем

служил вариант без удобрений – «0». Использовали две системы обработки почвы: чизельную (Ч) и отвальную (О) обработку под предшествующую культуру. Почву для анализа отбирали на закрепленных площадках в слое 0–30 см, в отобранных образцах определяли фосфор по методу Мачигина в модификации ЦИНАО [24].

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., сохраняемых – 5 шт. из которых были выбраны три по сети, имеющих наибольшую обучающую и контрольную производительность при наименьшей ошибке [25].

Результаты исследования и обсуждение

Содержание подвижного фосфора в почве играет большую роль в питании растений. Часть этого элемента теряется со стоком и смывом, поэтому оценить его содержание в почве и составить долгосрочный прогноз, было одной из приоритетных задач. Долгосрочный прогноз динамики содержания подвижного фосфора был сделан с помощью АНС на столетний период, с использованием фактических временных рядов, полученных в результате отбора почвенных образцов в 1986–2022 гг.

В результате анализа были получены предсказанные значения, а затем сопоставлены с фактическим содержанием подвижного фосфора в почве в 2022 году. На основании прогноза можно заключить, что в вариантах без внесения удобрений во всех севооборотах отмечена общая тенденция снижения содержания подвижного фосфора до 11,5–18,6 мг/кг (или в среднем он уменьшился на 12,5–15,4 %). Длительный вынос P_2O_5 и потери со стоком и смывом привели к снижению этого элемента: в севообороте «А» до 11,2–16,8 мг/кг (на 24,1–25,3 %); в севообороте «Б» – до 11,3–17,5 мг/кг (на 8,9–24,6 %); в севообороте «В» – до 11,3–17,5 мг/кг (на 6,9–39,9 %) (табл. 1).

Таблица 1. Фактические и предсказанные значения содержания подвижного фосфора в черноземах обыкновенных в севооборотах различных конструкций, мг/кг

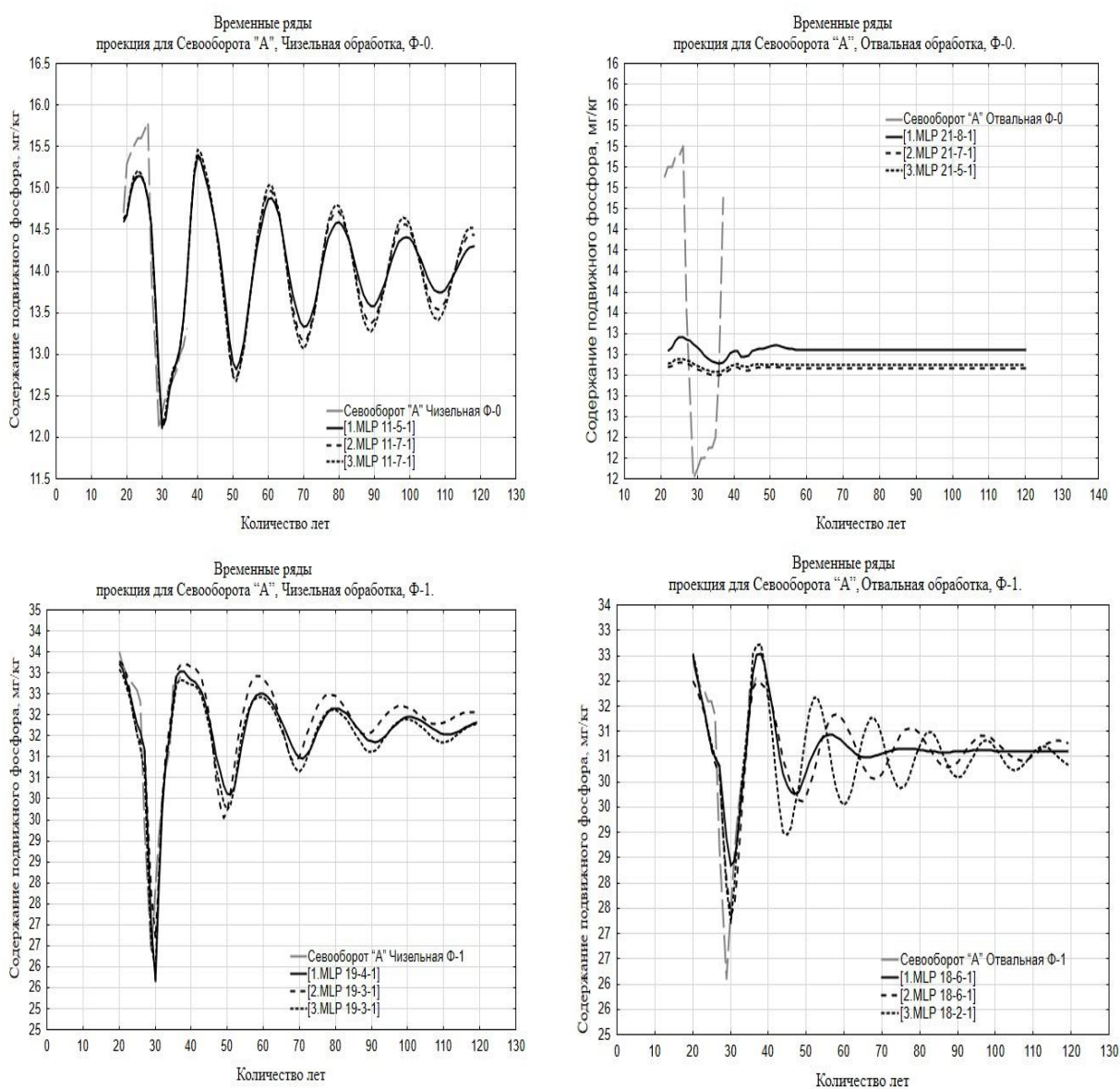
Севооборот	Уровень применения удобрений	Способ обработки почвы	Фактические значения		Предсказанные значения			
			1986 г.	2022 г.	номер нейронной сети / min/max			Среднее, (M)
					1	2	3	
А	0	Ч	17,3	13,3	11,9–17,6	11,5–18,6	11,5–17,6	14,1
		О	17,3	14,7	13,1–13,4	12,0–13,1	12,2–13,2	13,9
	1	Ч	17,3	32,9	25,7–33,2	26,7–33,3	25,9–33,1	29,4
		О	17,3	32,1	28,4–32,9	27,3–32,1	27,2–32,9	29,8
	2	Ч	17,3	42,2	40,3–47,5	40,6–47,3	40,1–47,6	41,8
		О	17,3	41,7	40,0–46,6	40,7–46,3	40,0–46,7	40,9
Б	0	Ч	16,8	15,1	11,6–16,3	11,2–16,0	11,6–16,4	14,0
		О	16,8	15,3	11,3–16,8	11,4–16,4	11,6–16,4	13,9
	1	Ч	16,8	35,0	30,6–38,3	30,6–38,2	30,7–38,2	32,4
		О	16,8	33,3	32,9–35,8	32,3–35,7	32,0–35,7	32,2
	2	Ч	16,8	55,7	41,9–58,1	42,1–57,6	42,1–57,7	47,7
		О	16,8	57,7	39,9–57,1	40,3–58,0	40,6–58,1	46,1
В	0	Ч	18,8	15,3	11,5–17,2	11,8–17,3	11,3–17,5	14,8
		О	18,8	16,0	14,4–17,4	14,7–17,5	14,6–17,4	15,3
	1	Ч	18,8	37,2	34,0–37,6	34,0–37,6	34,2–37,6	33,6
		О	18,8	33,9	34,5–44,3	34,5–44,3	34,7–44,3	34,9
	2	Ч	18,8	58,9	44,3–59,1	44,5–58,8	44,5–59,0	53,6
		О	18,8	57,6	38,8–58,4	38,8–58,0	39,6–58,4	57,2

На рис. 1 отмечены колебания в содержании фосфора в первые годы составления прогноза между максимальными и минимальными значениями, а с течением времени разница уменьшается и содержание P_2O_5 приходит к средним величинам.

В севообороте «А», в структуре посевных площадей с долей чистого пара 20 %, отмечаются наибольшие эрозионные процессы, а смыв почвы в среднем за период исследования составляет 5,8 т/га [4]. Вместе с потерей почвы происходит потеря элементов питания, в том числе и подвижного фосфора.

Систематическое внесение удобрений в средних дозах поддерживает фактическое содержание подвижного фосфора на уровне 32,1–32,9 мг/кг. В результате составленного прогноза полученные значения колеблются в широких пределах от 25,7 до 33,3 мг/кг, в среднем прогнозные значения составляют 29,8 мг/кг, что незначительно меньше фактических.

Увеличение дозы внесения удобрений в полтора раза позволяет сохранять содержание подвижного фосфора по сравнению с исходными значениями (1986 г.) на более высоком уровне (в 2–3 раза). В севообороте «А» фактические значения подвижного фосфора были равны 41,2–41,7 мг/кг, а значения, полученные в результате нейросетевого прогноза, колебались в пределах от 40,3 до 47,6 мг/кг. Эти незначительные колебания показаны на рис. 1 в виде прямых линий на уровне значений 42–43 мг/кг.



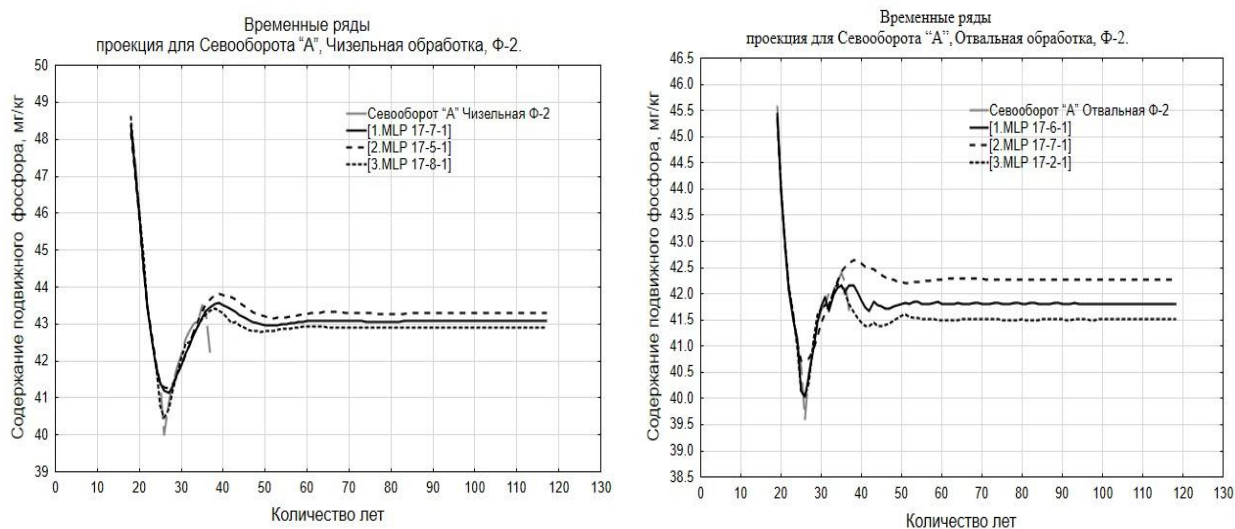
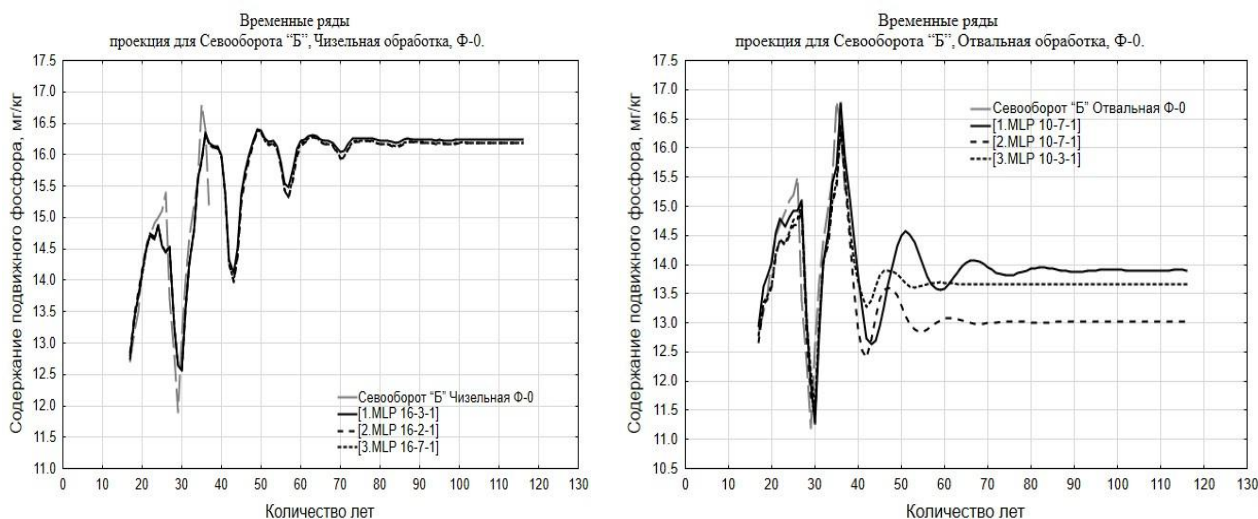


Рис. 1. Проекция временного ряда до 2122 года содержания подвижного фосфора (мг/кг) в черноземах обыкновенных в севообороте «А» с долей чистого пара 20%.

В севообороте «Б», имеющем в структуре посевов двадцатипроцентное поле многолетних трав, фактические значения подвижного фосфора в варианте содержания P_2O_5 было в пределах 15,3 мг/кг, а при внесении средних доз удобрений его фактическое содержание увеличилось до 33,3–35,0 мг/кг. Составленный прогноз с использованием АНС выявил незначительное снижение содержания подвижного фосфора в среднем до 13,9–14,0 мг/кг в вариантах естественного плодородия и до 32,2–32,4 мг/кг при внесении средних доз удобрений. Двадцатипроцентное поле многолетних трав способно до определенного предела защитить почву от процессов эрозии и предотвратить потери фосфора со стоком и смывом (рис. 2).



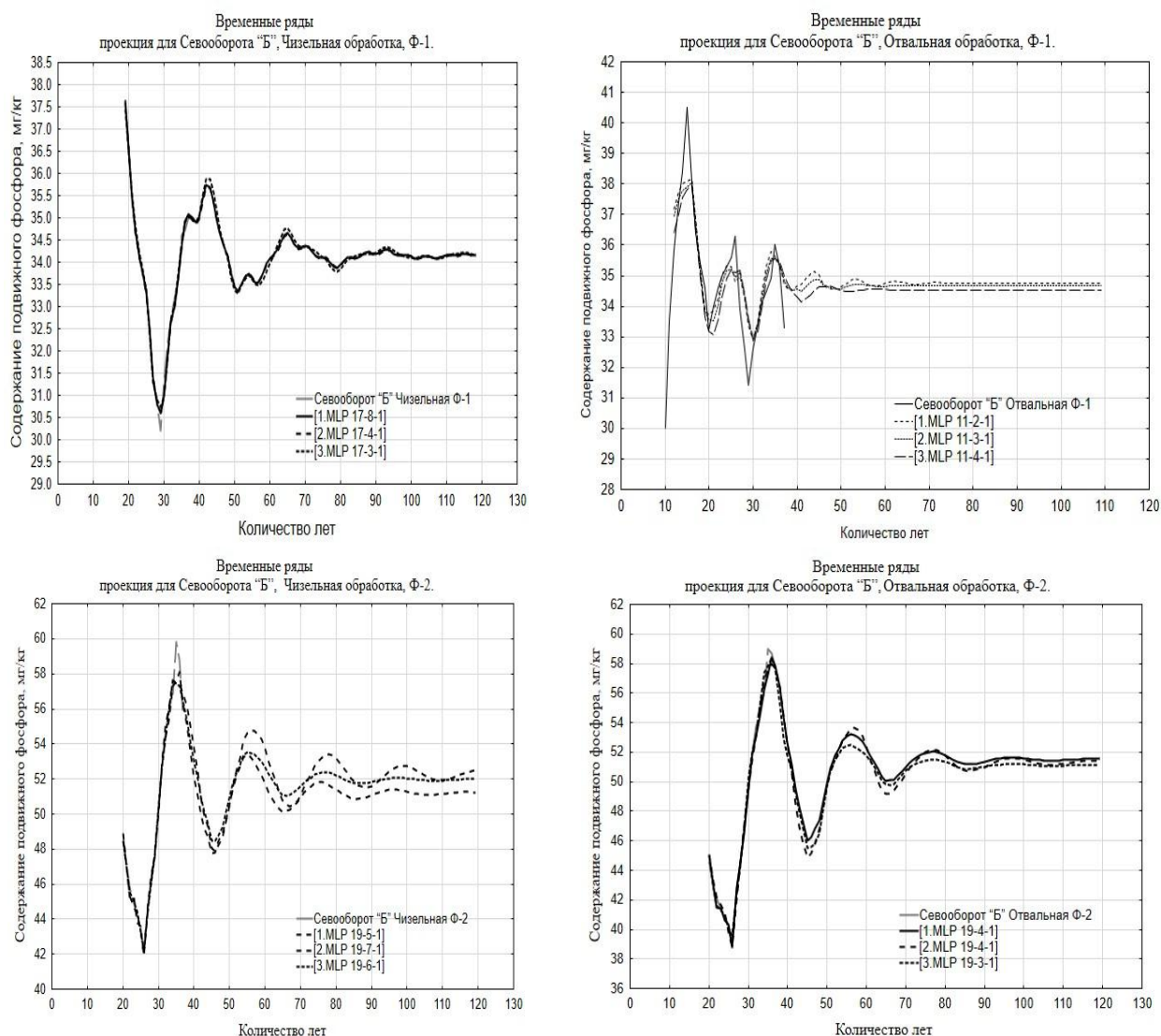


Рис. 2. Проекция временного ряда до 2122 года содержания подвижного фосфора (мг/кг) в черноземах обыкновенных в севообороте «Б» (20 % многолетних трав).

Наличие в севооборотах многолетних трав и увеличение дозы внесения удобрений в полтора раза позволило сохранить содержание подвижного фосфора на уровне фактических значений. В севообороте «Б» фактические значения были равны 55,7–57,7 мг/кг, а предсказанные колебались в широких пределах 39,9–58,1 мг/кг. Как было отмечено выше, значительные колебания в содержании фосфора отмечены в первые годы прогноза, а затем наступает равновесие и его содержание колеблется в пределах 46,1–47,7 мг/кг или в два-три раза больше, чем исходное содержание.

Проекция временного ряда до 2122 года содержания подвижного фосфора в черноземах обыкновенных в севообороте «В» показана на рис. 3.

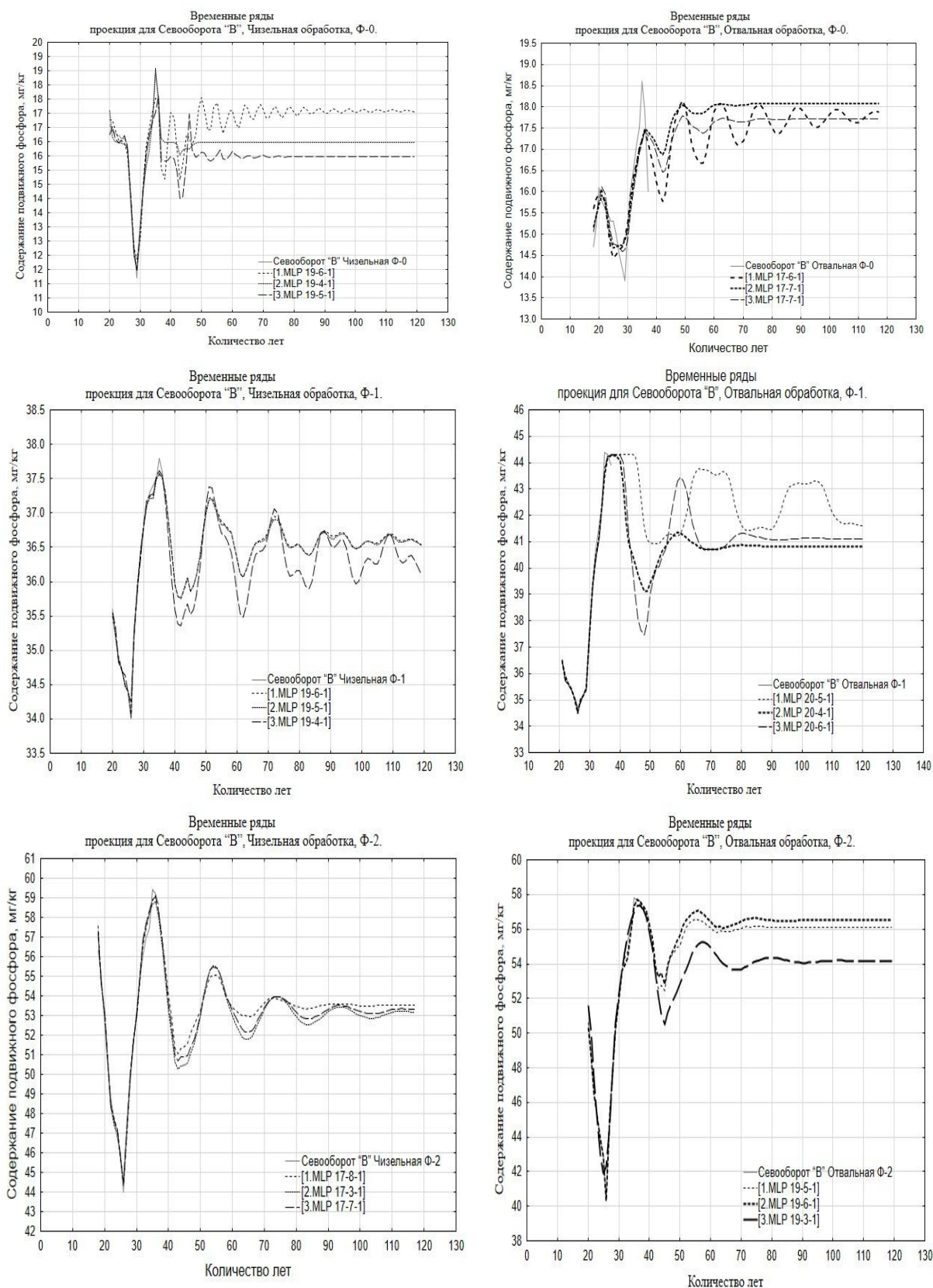


Рис. 3. Проекция временного ряда до 2122 года содержания подвижного фосфора в черноземах обыкновенных в севообороте «В», мг/кг

Многолетние травы способны предотвратить в севооборотах потери почвы и вместе с ней потери основных элементов питания, в частности, подвижного фосфора. Увеличение доли многолетних трав до 40 % в почвозащитном севообороте «В» сократило разрыв между фактическими и предсказанными значениями (15,3–16,0 и 14,8–15,3 мг/кг) в варианте естественного плодородия не только за счет снижения процессов деградации, но и за счет поступления в почву большого количества растительных остатков.

Внесение средних доз удобрений также незначительно повлияло на средние значения содержания P_2O_5 в почве (33,9–37,2 и 33,6–34,0 мг/кг), что подтверждает сохранение плодородия на исходном уровне. При отсутствии стока и смыва и внесении средних доз удобрений возможно сохранить плодородие почвы в этом севообороте на исходном уровне. Аналогичная тенденция отмечена и при внесении повышенных доз удобрений: разница между фактическими и предсказанными значениями не существенна (57,6–58,9 и 38,8–59,1 мг/кг). Средние значения содержания подвижного фосфора, полученные в результате составления длительного прогноза, были в пределах 53,6–57,2 мг/кг, увеличение значений более чем в три раза подтверждает предположение о накоплении этого элемента в пахотном слое и может быть расценено как расширенное воспроизводство плодородия.

Использование почвозащитной обработки в сравнении с контрольным вариантом не повлияло на изменение фосфорного режима и содержание P_2O_5 не превышало 5 %.

Полученный прогноз содержания подвижного фосфора в пахотном слое подтверждает эффективность применяемых противозерозивных мероприятий: контурно-полосное размещение сельскохозяйственных культур, наличие в севообороте многолетних трав от 20 до 40 % и внесение повышенных доз удобрений.

Выводы

Таким образом, составленный прогноз с использованием нейронных сетей содержания подвижного фосфора в черноземе обыкновенном среднеэродированном выявил различную динамику. В варианте естественного плодородия во всех севооборотах отмечена общая тенденция снижения подвижного фосфора на 11,5–25,3 %. Внесение удобрений в средних дозах не позволяет поддерживать содержание подвижного фосфора в почве в севообороте «А» с 20 % чистого пара на исходном уровне, и оно снижается на

20,7 %. Средний фон минерального питания в севооборотах «Б» и «В» позволяет поддерживать содержание подвижного фосфора на исходном уровне. В севообороте с долей многолетних трав в структуре посевных площадей 40 % и увеличении дозы внесения удобрений до повышенной – $N_{84}P_{30}K_{48}$ – отмечается расширенное воспроизводство плодородия почвы.

Список использованных источников:

1. Безуглова, О.С. Динамика деградации земель в Ростовской области / О.С. Безуглова, О.Г. Назаренко, И.Н. Ильинская // Аридные экосистемы, 2020. Том 26, №2 (83). С. 10–15. <https://doi.org/10.1134/S207909612002002X>
2. Медведева, А.М. Подвижность и распределение фосфора в черноземе обыкновенном при различных агротехнологиях / А. М. Медведева, О. А. Бирюкова, Т. М. Минкина [и др.] // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. – 2021. – № 4(212). – С. 95-102. – <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2021-4-95-102>.
3. Шапошникова И.М., Лабынцев А.В. Фосфатный режим чернозёма обыкновенного Ростовской области и эффективность фосфорных удобрений // Агрохимия. – 1998. – № 9. – С. 53–57.
4. Гаевая, Э.А. Агрофизические свойства чернозема обыкновенного слабоэродированного в длительном опыте в Ростовской области / Э.А. Гаевая, О.С. Безуглова, Е.Н. Нежинская // Почвоведение. – 2022. – № 11. – С. 1399-1414. <https://doi.org/10.31857/S0032180X22110053>
5. Гаевая, Э.А. Изменение фосфорно-калийного режима черноземов обыкновенных в длительном опыте Ростовской области / Э.А. Гаевая, И.Н. Ильинская, О.С. Безуглова, Е.Н. Нежинская // АгроЭкоИнфо. – 2022. – № 2(50). – https://agroecoinfo.ru/STATYI/2022/2/st_202.pdf.
6. Наими, О.И. Влияние гуминовых препаратов на содержание подвижного фосфора и активность фосфатазы в черноземе обыкновенном под посевами озимой пшеницы / О.И. Наими, М.Н. Дубинина, В.А. Матюгин [и др.] // Земледелие. – 2023. – № 5. – С. 32-36. – <https://doi.org/10.24412/0044-3913-2023-5-32-36>.
7. Мониторинг плодородия почв Ростовской области. Агрохимическая служба России. Рассвет. 2023. 8 с.
8. Минакова, О.А. Плодородие выщелоченного чернозема как результат 85-летнего применения удобрений в зерносвекловичном севообороте в условиях ЦЧР / О. А. Минакова, Л. В. Александрова, Т. Н. Подвигина // Агрохимия. – 2023. – № 9. – С. 14-21. – <https://doi.org/10.31857/S0002188123080070>.

9. Караулова, Л. Н. Изменение параметров агрохимических свойств черноземных почв в условиях длительного применения удобрений / Л. Н. Караулова, О. Г. Чуян, О. А. Митрохина // Земледелие. – 2024. – № 2. – С. 13-19. – <https://doi.org/10.24412/00443913-2024-2-13-19>.
10. Сычев, В.Г. Содержание гумуса, подвижного фосфора, обменного калия и степень кислотности пахотных почв Российской Федерации / В.Г. Сычев, А.В. Кузнецов, А.В. Павлихина, Н.В. Лобас // Плодородие. 2008. № 3 (42). С. 1–3.
11. Сычев, В.Г. Оценка динамики содержания подвижного фосфора в чернозёмных почвах Центрального Предкавказья / В. Г. Сычев, Ю. И. Гречишкина, А. В. Матвиенко // Плодородие. – 2022. – № 5(128). – С. 3-7. – <https://doi.org/10.25680/S19948603.2022.128.01>.
12. Суринов, А.В. Основные результаты мониторинга плодородия пахотных почв в лесостепной зоне ЦЧР (на примере Белгородской области) / А.В. Суринов // АгроЭкоИнфо. – 2021. – № 6(48). – <https://doi.org/10.51419/20216632>.
13. Тютюнов, С. И. Комплексная оценка влияния многолетнего применения удобрений на основные показатели плодородия чернозема типичного / С. И. Тютюнов // Плодородие. – 2021. – № 3(120). – С. 45-48. – <https://doi.org/10.25680/S19948603.2021.120.07>.
14. Чекмарёв, П.А. Мониторинг содержания подвижных форм фосфора и калия в пахотных почвах Белгородской области / П.А. Чекмарёв, С.В. Лукин // Достижения науки и техники АПК. 2020. Т. 34. № 2. С. 5–9.
15. Теучеж, А.А. Сравнительная характеристика содержания подвижного фосфора в почвах лесополос и сельскохозяйственных полей / А. А. Теучеж // Экологический Вестник Северного Кавказа. – 2020. – Т. 16, № 2. – С. 37-41.
16. Сыщиков, Д.В. Подвижные фосфаты в почвах деградированных агроэкосистем Донецкой Народной Республики / Д.В. Сыщиков, И.В. Агурова // Промышленность и сельское хозяйство. – 2024. – № 4(69). – С. 14-20.
17. Прошкин, В. А. Модель прогноза прибавки урожайности озимой пшеницы при применении фосфорных удобрений / В. А. Прошкин, С.Н. Адрианов, Е.В. Шаброва // Агрохимия. – 2011. – № 6. – С. 19-26.
18. Li, X.Y. Prediction results of different modelling methods in soil nutrient concentrations based on spectral technology / X.Y. Li, P.P. Fan, Y. Liu [et al.] // Zurnal Prikladnoj Spektroskopii. – 2019. – Vol. 86, No. 4. – P. 673(1)-673(7).
19. Sharipova, S. Development of a neural network model for training data on the effects of phosphorus on spring wheat growth / S. Sharipova, A. Akanova, N. Ospanova // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2023. – Vol. 6, No. 4 (126). – P. 32-38. – <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.292849>.
20. Sharipova, S. Ye. Development of a neural network model for prediction of the effect of phosphorus on the yield of spring wheat / S.Ye. Sharipova, A.S. Akanova // Вестник Алматинского университета энергетики и связи. – 2023. – No. 1(60). – P. 111-120. – https://doi.org/10.51775/2790-0886_2023_60_1_111.

21. Бисчоков, Р.М. Анализ, моделирование и прогноз урожайности сельскохозяйственных культур средствами искусственных нейронных сетей / Р. М. Бисчоков // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Агрономия и животноводство. – 2022. – Т. 17, № 2. – С. 146-157. – <https://doi.org/10.22363/2312-797X-2022-17-2-146-157>.

22. 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.

23. 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.

24. ГОСТ 26205-91. Почвы. Определение подвижных соединений фосфора и калия по методу Мачигина в модификации ЦИНАО. – Дата введения 1993-07-01. – М.: Стандартинформ, 1998. – 10 с.

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

Цитирование:

Безуглова О.С., Гаевая Э.А. Прогноз содержания подвижного фосфора в агрочернозёмах Ростовской области с использованием автоматизированных нейронных сетей [Электрон. ресурс] // АгроЭкоИнфо: Электронный научно-производственный журнал. – 2025. – № 2. – Режим доступа: http://agroecoinfo.ru/STATYI/2025/2/st_216.pdf
DOI: <https://doi.org/10.51419/202152216>.