

V.M. Kosolapov, A.N. Ulanov, V.N. Kovshova, A.V. Smirnova, A.L. Glubokovskikh, N.A. Ulanov
Federal Williams Research Center of Forage Production & Agroecology, Nauchnyi gorodok ul. bldg. 1,
141055 Lobnya, Russia, e-mail: vnii.kormov@yandex.ru

The results of long-term observations of changes in the agrochemical properties of peat and developed soils used in feed production are presented. It is established that to maintain the productive longevity of forage crops and, at the same time, to form a fully developed soil profile, additional energy is required in the form of an annual application of a balanced nitrogen-phosphorus-potassium fertilizer. Even a slight deviation from the established fertilizer system leads to the immediate degeneration of perennial mowing grass stands, a decrease in the feedability of pasture feed, and a dramatic decrease in the productivity of grain, silage, and row crops. The directed regulation of the water regime of the developed peatlands significantly increases the efficiency of fertilizers.

Key words: peat hags, soils, fertilizer mixtures, forage crops, soil fertility, productive longevity, water and food regimes.

УДК 631.452:631.445.5:631.55:633.11

DOI: 10.25680/S19948603.2021.120.06

УПРАВЛЕНИЕ ПЛОДОРОДИЕМ КАШТАНОВОЙ ПОЧВЫ И ПРОГНОЗНЫЕ СЦЕНАРИИ УРОЖАЯ ЯРОВОЙ ПШЕНИЦЫ: ЦИФРОВАЯ БАЗА, СТАТИСТИКИ И МОДЕЛИ ДИАГНОСТИКИ

(по данным длительного полевого опыта Географической сети опытов с удобрениями)

Л.В. Будажапов, чл.-корр. РАН, А.К. Уланов, д.с.-х.н., А.С. Билтуев, к.б.н.,

ФГБНУ Бурятский научно-исследовательский институт сельского хозяйства
670045, г. Улан-Удэ ул. Третьякова, д.25 «з», E-mail: burnish@inbox.ru



В длительном полевом стационарном опыте с удобрениями в формате Географической сети на каштановой почве (регистрационный №100) по данным пятидесяти лет исследований сформирована цифровая база данных по изменению ключевых показателей почвенного плодородия во времени под систематической нагрузкой минеральных и органических удобрений в аридных режимах сухой степи Бурятии. По результатам статистического анализа и математического моделирования предложены «ключи» к диагностике изменения гумусного состояния и азотного фонда почвы при внесении разных комбинаций и сочетаний удобрений в текущем и тактическом ожидании с оценкой скоростных изменений. Пролонгированное наполнение кинетических характеристик сопряженными параметрами позволяет выстроить управление плодородием этих хрупких почвенных систем сухой степи через прогнозные модели при изменении количественных параметров. Вариативность воздействия удобрений в систематическом их проявлении позволяет значительно расширить панораму диагностики и управления почвенным плодородием и раскрыть масштабные количественные и кинетические изменения во времени. На основании длительного ряда наблюдений по реакции растений яровых зерновых культур на поступление целого спектра минеральных и органических удобрений сформированы различные сценарии по прогнозу урожая яровой пшеницы для различных режимов увлажнения.

Ключевые слова: каштановая почва, длительный полевой опыт, база данных плодородия почвы, статистический анализ, математическое моделирование, «ключи» управления плодородием почв, прогнозные сценарии урожая яровой пшеницы.

Для цитирования: Будажапов Л.В., Уланов А.К., Билтуев А.С. Управление плодородием каштановой почвы и прогнозные сценарии урожая яровой пшеницы: цифровая база, статистики и модели диагностики // Плодородие. – 2021. – №3. – С. 39-44. DOI: 10.25680/S19948603.2021.120.06.

Современный уровень мотивации и актуальности высокой результативности длительных полевых стационарных опытов с удобрениями в системе Географической сети опытов в Российской Федерации представляет масштабированный для разных агропочвенных и климатических ресурсов экспериментальный материал по формированию уникальной цифровой базы данных системы почва – удобрение – растение. В этом построении, помимо простого цифрового «хранения» целой серии данных по изменению показателей плодородия почв и продуктивности пашни для конкретных режимов с последующим оперативным пополнением новой текущей входящей информации, видится уникальная возможность прогнозирования текущих, тактических и стратегических изменений в функционировании системы почва – растение во времени и пространстве.

В этом представлении накопленный в течение полувека материал в длительном полевом стационарном опыте на каштановой почве сухой степи не является исключением. Более того, широтный пояс хрупких аридных почв сухой степи простирается на обширнейшем пространстве южных границ европейской части и юго-восточных рубежей Российской Федерации и по разным оценкам охватывает территорию с площадью пашни каштановых почв порядка 3 млн га [1, 2]. Соответственно, обобщение результатов исследований с использованием классических и современных методов анализа и интерпретации позволяет подобрать агрохимические «ключи» к управлению плодородием этих хрупких почвенных систем и верифицировать для конкретных эколого-почвенных условий и прогнозных сценариев (от критически рискованного до позитивного оптимистического) при различных вводных параметрах. Последние на основе длительных наблюдений в развитии цифрового подхода к построению прогноза служат исходным материалом для формирования ресурсной базы данных с последующей цифровизацией плодородия каштановой почвы.

Цель исследований – по данным 50-летнего систематического внесения минеральных и органических удобрений и статистического анализа по изменению плодородия каштановой почвы и урожая зерновых культур сформировать ресурсную цифровую базу прогнозных сценариев функционирования системы почва – растение на основе математического моделирования как концепции управления плодородием и продуктивностью пашни азиатской части России.

Методика. Обширная и развернутая общая выборка (n) данных по изменению исходного (1967 г.) плодородия каштановой почвы во времени ($n = 55$) достигнута по результатам длительных наблюдений в стационарном полевом опыте с ежегодным внесением минеральных и органических удобрений под яровые зерновые культуры в типичных аридных условиях сухой степи северной части Центральной Азии. География расположения длительного опыта – Республика Бурятия, МО Иволгинский район, квартал Юбилейный, опытное поле ФГБНУ Бурятский НИИСХ с кадастровым номером земельного участка 03:08:080202:138 и географической привязкой в сетевом окружении по GPS навигации в виде: 51° 43' 36" северной широты и 107° 14' 44" восточной долготы.

Полевой опыт заложен в 1967 г. под научно-методическим руководством коллектива Географиче-

ской сети опытов с удобрениями ВИУА им. Д.Н. Прянишникова (Найдин, Михайлов, Аникст). В настоящее время методическое сопровождение осуществляет ВНИИ агрохимии им. Д.Н. Прянишникова (регистрационный номер № 100), научным консультантом на протяжении более 30 лет является академик РАН Гамзиков Г.П.

Опыт развернут во времени и пространстве на общей площади 8 га (4 поля по 2 га) с площадью делянок 112 м² и учетной площадью 80 м² при систематическом их размещении. В опыте принято чередование чистого пара и яровых зерновых культур: 1 – пар чистый; 2 – яровая пшеница; 3 – овес; 4 – овес на зеленую массу. Агротехника культур общепринятая согласно зональной системы земледелия (2018). Для посева используют районированные сорта яровых зерновых культур. К настоящему времени в полевом опыте прошло десять ротаций четырехпольного (1982–2021 г.) и две ротации шестипольного севооборота (1967–1981 г.).

Схема длительного полевого опыта с внесением удобрений включает 13 вариантов в 4-кратной повторности: 1. Без удобрений; 2. P₂₀; 3. N₂₀P₂₀; 4. N₂₀P₂₀K₂₀; 5. N₄₀P₄₀; 6. N₄₀K₄₀; 7. P₄₀K₄₀; 8. N₄₀P₄₀K₄₀; 9. N₆₀P₄₀K₄₀; 10. Навоз, 20 т/га; 11. Навоз, 40 т/га; 12. N₁₀₀P₅₀K₁₂₀ – эквивалентно 20 т/га навоза; 13. Навоз, 10 т/га + N₅₀P₂₅K₆₀ – эквивалентно 10 т/га навоза.

Почва полевого опыта относится к каштановой мучнисто-карбонатной легкого гранулометрического состава с наличием карбонатов в слое 25–40 см (вскипание от HCl) в виде «мягкой» мучнистости, безгипсовости профиля и отсутствием легкорастворимых солей при слабой водоудерживающей способности, высокой аэрируемости и повышенной теплопроводности и наличием сезонной многолетней мерзлоты байкальского типа (Куликов и др., 1997). По предложенной Л.Л. Шишовым и др. (2004) классификации почв, почвенный профиль почвы опытного поля определяется в виде горизонтов: АJ – ВМК – САТ – Сса (светло гумусовый – ксерометаморфический – текстурно-карбонатный) и подтверждает типичную специфику почв (крио) аридных территорий Российской Федерации.

По плодородию исходная почва (0–20 см, 1967 г.) характеризовалась близкой к нейтральной реакцией среды (рН 6,9 ± 0,2), низким содержанием общего (904,2 ± 3,1 мг/кг) и нитратного азота (5,8 ± 0,3 мг/кг), высокой обеспеченностью подвижным фосфором (23,0 ± 1,8 мг/100 г) и повышенным – обменным калием (9,5 ± 0,6 мг/100 г) с невысокой емкостью поглощения (16,8 ± 3,0 мг-экв/100 г) при содержании гумуса 1,31 ± 0,05 %.

По гидротермическим параметрам каштановая почва легкого гранулометрического состава имела типичные характеристики для этого региона: непромывной тип водного режима и сезонно-промерзающий температурный режим, высокий потенциал криогенеза (54–1) с уровнем сезонно – талого слоя 3,4 м (пределы 1,6–3,7 м), низкий коэффициент увлажнения (К увл. 0,34–0,44 в период V – IX) при среднегодовой температуре -0,9...–2,3 °C и дефиците осадков (168–288 мм), непродолжительный безморозный период (109–116 дней) при доминировании (по модулю) холодных воздушных масс (сумма температур ≤ – 10 °C –2080 ... – 2717 °C) над активным тепловым оборотом (сумма температур ≥ 10 °C 1580–1980 °C).



Рис. 1. Обсуждение опыта со специалистами



Рис. 2. Изучение схемы полевого опыта

При оценке агрохимических показателей и гидротермических характеристик почвы использовали общепринятые методы [3]. Учет урожая проводили с каждой деланки каждой повторности полевого опыта. Почвенные образцы отбирали ежегодно до посева весной на запасы продуктивной влаги и содержание общего и нитратного азота и осенью после уборки культур с 0-20 см слоя почвы. Через каждые четыре года, по завершении одной полной ротации чередования культур, с каждого варианта полевого опыта отбирали почвенные образцы на содержание углерода, общего азота и подвижных веществ.

Вариационно-статистический анализ накопленной базы данных за полувековой период наблюдений ($n = 50$) по содержанию гумуса и общего азота в почве, урожаю яровой пшеницы, осадкам за вегетацию проводили с использованием продукта Excell.

Математические модели в виде экспоненциальных регрессий и полиномов разного порядка по изменению содержания гумуса и общего азота в почве во времени (через каждые пять – десять лет), а также по урожаю зерновых культур выступали в качестве цифровых агрохимических «ключей» по управлению плодородием почвы под влиянием систематического внесения минеральных и органических удобрений. В этом представлении по изучаемым признакам удалось вычлнить скоростные параметры этих изменений, а величина ки-

нетических констант (k) выступала в качестве устойчивого признака в диагностике изменения содержания по фактору времени в масштабированном проявлении.

По данным 50-летних исследований проведен масштабный статистический анализ накопленной информации показателей плодородия почв и урожая зерновых культур в длительном ряду наблюдений. В результате этого подхода к обобщению экспериментального материала удалось сформировать различные базовые сценарии по прогнозу урожая яровой пшеницы под воздействием систематического внесения удобрений для разных режимов увлажнения сухой степи по осадкам.

Результаты и их обсуждение. В ретроспективном обобщении статистических параметров по изменению гумусного состояния каштановой почвы на ежегодное внесение минеральных и органических удобрений в длительном ряду наблюдений, ключевым аспектом выступают не только различия количественных изменений, но и скоростные изменения в содержании гумуса в почве на момент времени (табл.1). Причем, последние в совокупности с первыми отражают наиболее визуализированное восприятие панорамы достоверного и поступательного снижения (без удобрений), поддержания (NPK) и увеличения (навоз) исходного уровня гумуса в почве под нагрузкой разных изучаемых признаков оценки.

1. Статистические и кинетические показатели изменений содержания гумуса в почве при длительном внесении минеральных и органических удобрений, 0-20 см ($n = 50$)

Вариант опыта	Статистика изменений, %			Кинетика изменений	
	$M \pm m$	lim	V	модель прогноза	константа – k
1. Исходная почва	$1,31 \pm 0,05$	$1,22 - 1,40$	6,1	-	-
2. Без удобрений	$0,96 \pm 0,02$	$0,91 - 1,01$	2,8	$y = 1,323 e^{-0,008 t}$	$0,008 \text{ год}^{-1}$
3. $N_{40}P_{40}K_{40}$	$1,19 \pm 0,04$	$1,13 - 1,25$	4,3	$y = 1,300 e^{-0,003 t}$	$0,003 \text{ год}^{-1}$
4. Навоз, 20 т/га	$1,48 \pm 0,03$	$1,43 - 1,52$	3,5	$y = 1,323 e^{0,002 t}$	$0,002 \text{ в год}$
5. Навоз, 10 т/га + $N_{50}P_{25}K_{60}$	$1,43 \pm 0,04$	$1,37 - 1,49$	4,6	-	-
HCP_{05}	0,10				

Примечание. k – константа скорости процесса, t – порядковый номер года от исходного.

В результате проведенных длительных наблюдений доказано наибольшее и достоверное снижение содержания гумуса в почве в контрольном варианте (без удобрений), которое, по выборочной средней, составило $0,96 \pm 0,02\%$ с минимальным и узким пределом величин ($0,91-1,01\%$) и высокой устойчивостью снижения во времени (см. табл. 1). Причем, характер этого процесса подчинялся функции экспоненциальной регрессии с константой (k) скорости процесса $k = 0,008 \text{ год}^{-1}$. Величина этого кинетического проявления оказалась наибольшей в реестре изучаемых вариантов опыта и

отражает наибольшие темпы снижения гумуса в почве в отсутствии поступления дополнительных источников поддержания исходного уровня. И если количественные показатели схожего снижения содержания гумуса в каштановой почве ранее выявлены в многолетних исследованиях [4, 5], то кинетическая составляющая (k) подобного снижения получена, благодаря пролонгированному ряду наблюдений в динамике длительного стационарного полевого опыта.

При систематическом внесении полного минерального удобрения статистические и кинетические харак-

теристики отклика гумусного состояния почвы в этом проявлении складывались иначе. Содержание гумуса в почве при ежегодном поступлении полного минерального удобрения оказалось значимо выше контрольного и в среднем достигало $1,19 \pm 0,04\%$ при более высоких значениях лимитов. В этом обобщении цифрового массива данных, при всей общепризнанной позитивности полного минерального удобрения [4, 5], систематическое их внесение не сопровождалось адекватно выраженным позитивным эффектом и не обеспечивало поддержание исходного уровня гумуса в почве. Ранее аналогичный расклад в отношении влияния систематического внесения минеральных удобрений в поддержании конкретного уровня выявлен в длительных опытах Западной Сибири [6], Забайкалья [5] и европейской части России [4]. Отсюда и скоростная характеристика темпов снижения гумуса в почве оказалась почти втрое ниже, чем в отсутствии удобрений (контроль) с кинетической константой $k = 0,003 \text{ год}^{-1}$ с общим схожим характером снижения в виде экспоненты (см. табл. 1).

Наиболее позитивный отклик гумусного состояния почвы среди вариантов опыта отмечался при систематическом внесении навоза, под воздействием которого содержание гумуса в среднем ($n = 44$) достигало $1,48 \pm 0,03\%$ и в диапазоне нижних и верхних значений лимитов превышало исходное содержание. Позитивный отклик влияния навоза выявлен при увеличении дозы вдвое – содержание гумуса по выборочной средней достигало $1,50 \pm 0,03\%$ с пределами $1,44\text{--}1,56\%$. В концептуальном восприятии подобный эффект обусловлен привнесом в почву готовых форм гумусовых соединений и полуразложившихся органических остатков, а равно особенностями внутрипочвенной трансформации органической массы с более насыщенным включением в группы и фракции органического вещества почв [4, 5, 7]. Последнее для каштановой почвы не стало исключением. Подобное подтверждается скоростными характеристиками изменения содержания гумуса в почве при длительном внесении 20 т/га навоза. В отличие от вариантов без и с внесением минеральных удобрений кинетика (k) достоверного увеличения гумуса в почве отражала выраженный рост и составила $k = 0,002$ в год (табл. 1).

Ранжирование изменения содержания гумуса в почве по вариантам опыта за 50 лет наблюдений возрастало в ряду: без удобрений ($0,96 \pm 0,02\%$) → полное мине-

ральное удобрение ($1,19 \pm 0,04\%$) → навоз, 20 т/га ($1,48 \pm 0,03\%$) при значимом поступательном росте в последнем случае и существенном снижении по первым вариантам оценки. Адекватное ранжирование этих количественных изменений поддерживалось и скоростными характеристиками: без удобрений ($k = 0,008 \text{ год}^{-1}$) → полное минеральное удобрение ($k = 0,003 \text{ год}^{-1}$) → навоз ($k = 0,002 \text{ год}$). Как следствие, в линейке управления ключевым показателем плодородия каштановой почвы наиболее адекватным с пролонгированным позитивным эффектом среди вариантов, выступает только систематическое внесение навоза. В этом восприятии экспоненциальная прогнозная модель изменения содержания гумуса в почве во времени выступает в качестве способа диагностики и управления этим базовым показателем почвенного плодородия, а равно без и с внесением минеральных удобрений. Практически на любой (n) момент времени (t) появляется возможность прогнозировать и направлять путем вариативных схем поддержания и увеличения гумуса в почве – «ключи» управления гумусом через модель и наполняемую цифровую базу в длительном ряду.

Многочисленными работами доказан повсеместный дефицит азота с бедным качественным составом доступных форм в каштановых почвах [5, 6]. Результативность в длительном полевом опыте на протяжении полувекового периода позволила выстроить серию моделей прогноза содержания общего азота в почве во времени в качестве пролонгированной и оперативной схемы управления азотным фондом почвы и питанием растений.

Изменение содержания общего азота каштановой почвы под воздействием разных схем и комбинаций внесения минеральных удобрений за более чем 50-летний период складывалось неоднозначно. Наибольший дефицит (-180 мг/кг) выявлен в варианте без удобрений с позитивным эффектом длительного внесения 40 т/га навоза ($+150 \text{ мг/кг}$) с минимальными издержками (-90 мг/кг) при систематическом внесении полного минерального удобрения (табл. 2). И если для европейской части России и Западной Сибири подобные количественные оценки на основе длительных опытов общепризнаны [2, 6, 7], то для аридных режимов этого региона до последнего времени отсутствовали и оставались в этом восприятии на уровне схожих «априори» заключений.

2. Статистики, динамика и кинетика (k) изменения содержания общего азота в почве при систематическом внесении минеральных и органических удобрений, 0–20 см ($n = 50$)

n	Вариант опыта и показатели оценки, мг / кг					
	Контроль	N ₄₀ P ₄₀	N ₄₀ K ₄₀	N ₄₀ P ₄₀ K ₄₀	Навоз, 20 т/га	Навоз, 40 т/га
5	810 ± 14	880 ± 13	878 ± 19	881 ± 12	902 ± 8	903 ± 8
10	780 ± 16	850 ± 16	865 ± 15	874 ± 12	910 ± 8	934 ± 8
20	750 ± 17	820 ± 10	840 ± 12	865 ± 10	914 ± 12	988 ± 12
30	740 ± 16	810 ± 12	820 ± 14	850 ± 13	928 ± 10	1022 ± 11
40	730 ± 17	785 ± 14	790 ± 14	835 ± 11	933 ± 14	1036 ± 14
50	720 ± 18	765 ± 10	770 ± 11	810 ± 10	940 ± 14	1050 ± 10
k	0.033 год ⁻¹	0.027 год ⁻¹	0.026 год ⁻¹	0.016 год ⁻¹	0.008 в год	0.030 в год

Примечание. Содержание N_{общ} в исходной почве (1967 г.) – 900 мг/кг.

Различия в отклике азотного фонда почвы по вариантам поддерживались и адекватными кинетическими изменениями содержания общего азота за 50-летний период (табл. 2). Наибольшая кинетика снижения (k) складывалась в варианте без удобрений (контроль) и достигала величины $k = 0,033 \text{ год}^{-1}$ с близкими скоростными параметрами в вариантах с парными (NP и NK) комбинациями удобрений ($k = 0,027 \text{ год}^{-1}$ и $k = 0,026$

год^{-1}) при слабой кинетике снижения с полным минеральным удобрением ($k = 0,016 \text{ год}^{-1}$). В этой оценке внесение длительного органического удобрения (навоз, 40 т/га) обеспечивало кинетику увеличения азотного фонда почвы с наибольшей скоростной составляющей – $k = 0,030$ в год (табл. 2). В последнем случае, кинетика увеличения общего азота в почве находилась в обратно пропорциональной зависимости, по модульной величине

не, скорости (k) снижения в контрольном варианте – 0,033 год⁻¹ (табл. 2). Отсюда, в реестре агрохимических приемов управления азотным фондом этой почвы (агрохимические «ключи») систематическое внесение навоза выступает в качестве наиболее эффективного решения через прогнозную модель на любой (n) момент времени (t) среди целой серии других прогнозных сценариев, согласно данным математического моделирования.

На основе длительного ряда наблюдений сформирована масштабная панорама цифровой базы данных урожая яровой пшеницы на каштановой почве, статистический анализ которой с развернутым математическим моделированием позволил выстроить серию прогнозных сценариев по оценке урожая в диапазоне от типичного дефицита осадков с весны – раннелетней

засухой до уровня увлажненного года сухой степи. На этом основании построены прогнозные сценарии урожаев на основе полиномиальных моделей разного порядка в варианте с внесением полного минерального удобрения (N₄₀P₄₀K₄₀). При отсутствии и остром дефиците внесения последних, значимость подобных оценок представляется актуальной в приложении текущего состояния и момента времени.

В результате статистического обобщения показателей урожая яровой пшеницы из общего длительного массива данных с учетом различий увлажнения сухой степи по осадкам в течение вегетации сформированы три прогнозных сценария разного уровня продуктивности с моделями прогноза урожая на последующий любой момент времени – t (табл. 3).

3. Прогнозные сценарии урожая яровой пшеницы при систематическом внесении полного минерального удобрения (N₄₀P₄₀K₄₀) для разного режима увлажнения (по данным длительного полевого опыта с удобрениями на каштановой почве)

Вариант А: острозасушливый режим (осадки ниже 185 мм, урожай 9,8 ± 1,6 ц/га)														
цифра	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
ц/га	10,1	14,2	7,2	6,7	6,5	8,8	15,1	26,1	12,5	11,3	8,8	3,5	2,8	4,9
Модель прогноза урожая (ц/га) = - 0,06 t ³ + 1,426 t ² - 10,22 t + 31,07														
Вариант В: умеренно-засушливый режим (осадки 185 – 230 мм, урожай 13,5 ± 2,0 ц/га)														
цифра	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	-	-	-	-
ц/га	27,0	14,0	17,7	8,1	16,2	10,3	12,2	11,2	14,8	3,1	-	-	-	-
Модель прогноза урожая (ц/га) = - 0,163 t ³ + 2,865 t ² - 15,66 t + 38,91														
Вариант С: увлажненный режим (осадки более 230 мм, урожай 25,2 ± 3,1 ц/га)														
цифра	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	-	-
ц/га	34,7	38,8	25,5	39,0	35,7	27,5	22,6	26,9	15,7	20,4	8,8	7,1	-	-
Модель прогноза урожая (ц/га) = - 0,240 t ² + 0,482 t + 35,13														



Рис. 4. Схема вариантов внесения удобрений

Из общего массива времени длительного полевого опыта по урожаю яровой пшеницы на каштановой почве при внесении полного минерального удобрения (N₄₀P₄₀K₄₀) 14 лет приходилось на острозасушливый уровень увлажнения (вариант А) при очень широком диапазоне лимитов (2,8-26,1 ц/га) и средних значениях урожая 9,8 ± 1,6 ц/га (см. табл. 3). Высокая вариабельность урожая на фоне выраженного дефицита осадков в течение вегетации, особенно в период весенней и раннелетней засухи, и крайне низком коэффициенте использования ¹⁵N удобрения (10% от внесенного) растениями [8] этот прогнозный сценарий отражал крайне неустойчивую панораму урожая с характером прогнозной модели для этих экстремальных условий в виде полинома третьего порядка (см. табл. 3).

С улучшением условий увлажнения сухой степи по осадкам (вариант В) в общей выборке урожаев яровой пшеницы приходилось только 10 лет. При внесении

минеральных удобрений урожай яровой пшеницы в этих условиях в среднем достигал 13,5 ± 2,0 ц/га с большей устойчивостью значений. В этих относительно более благоприятных условиях увлажнения, размеры использования ¹⁵N удобрения [8] оказались выше (18% от внесенного) и прогнозный сценарий отражал типичный уровень продуктивности с характером прогнозной модели в виде уравнения полинома третьего порядка.

При благоприятном увлажнении в течение вегетации (вариант С) уровень урожаев при внесении минерального удобрения находился в пределах высоких величин и достигал максимального 38,8-39,0 ц/га. В этих условиях, и коэффициент использования вносимого ¹⁵N удобрения был наибольшим (29% от внесенного). Однако, такие года наблюдались не чаще чем 1/3 из всего массива выборки со значительной долей засушливых лет (2/3). Урожай яровой пшеницы в этих благоприятных условиях оценки в про-

гнозном определении аппроксимировался моделью полинома второго порядка (см. табл. 3).

В общей совокупности данных ($n = 36$) урожай яровой пшеницы в варианте без внесения удобрений (контроль) на каштановой почве в среднем не превышал $5,5 \pm 0,3$ ц/га с пределами значений в диапазоне 4,0-7,4 ц/га. Отсюда, внесение минеральных удобрений обеспечивает значимый рост урожая яровой пшеницы, независимо от характера увлажнения, на протяжении длительного периода с различиями в прогнозных оценках по объективным параметрам плодородия и климата.

Заключение. Высокая информативность уникального полевого опыта с удобрениями на каштановой почве азиатской части России в длительном 50-летнем ряду наблюдений позволяет представить масштабную панораму количественных и скоростных изменений почвенного плодородия и урожая яровой пшеницы во времени под нагрузкой целого спектра вариативных комбинаций минеральных и органических удобрений с формированием ресурсной цифровой базы данных. Последняя позволяет разработать целую серию критериев («ключей») по диагностике, мониторингу и управлению хрупкими почвенными ресурсами сухостепных ареалов на основе статистического анализа, математического моделирования и приоритетного обобщения. В кратко-срочных и многолетних исследованиях реализация подобных подходов к оценке эффективного функционирования системы почва – растение во всем многообразии наполняемых изменений во времени остается не репрезентативной и не отражает стратегическую направленность. Как следствие, высокая результативность и масштабированная база длительных исследований создают реальные предпосылки для формирования новой архитектуры мышления и интерпретации результатов с огромным массивом сопряженных в разной степени параметров и признаков с визуализацией в виде прогнозных сценариев и математического (цифрового) моделирования.

В этом понимании предпринята попытка выстроить практику управления плодородием каштановой почвы по основным параметрам (гумусное состояние и азотный фонд почвы) в формате цифровых решений прогнозных экспоненциальных математических моделей на

конкретный (любой) момент времени (t) с диагностикой скоростных изменений увеличения, поддержания и снижения во времени по кинетическим константам (k). На этом основании результативный признак оценки (содержание гумуса и общего азота в почве) в этом управлении выступает в качестве цифровых агрохимических «ключей». При этом, наполняемость этих «ключей» новыми входными количественными и скоростными показателями, а равно новыми высокосопреженными признаками в длительном ряду наблюдений позволяет вводить корректировки в модельный механизм управления плодородием, отражая в этом отклике высокую динамичность и разную устойчивость отдельных характеристик под систематической нагрузкой минеральных и органических удобрений.

Масштабная выборка по урожаю яровой пшеницы в длительном ряду этого уникального полевого опыта вместе с вариационно-статистическим анализом и моделированием позволила выстроить серию сценариев по прогнозу урожая в черед разного уровня увлажнения сухой степи в виде модельных цифровых решений. В этом восприятии практическая значимость последних в полной мере отражает лучшую практику длительных опытов в формате Географической сети опытов с удобрениями в Российской Федерации.

Литература

1. *Плодородие почв России: состояние и возможности* (к 100-летию со дня рождения Т.Н. Кулаковской) / Под ред. В.Г. Сычева. – М.: ВНИИА, 2019. – 240 с.
2. Завалин А.А., Соколов О.А. Потоки азота в агроэкосистеме: от идей Д.Н. Прянишникова до наших дней. – М.: ВНИИА, 2016. – 595 с.
3. Шеуджен А.Х. Методика агрохимических исследований и статистическая оценка их результатов / А.Х. Шуджен, Т.Н. Бондарева. – Майкоп: Полиграф-Юг, 2015. – 664 с.
4. Семенов В.М., Козут Б.М., *Почвенное органическое вещество*. М.: ГЕОС, 2015. – 233 с.
5. Чимитдоржиева Г.Д. Органическое вещество холодных почв. – Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 2016. – 338 с.
6. Гамзиков Г.П. Агрохимия азота в агроценозах / Рос. акад. с.-х. наук, Сиб. отд.-ние. Новосибир. гос. аграр. ун-т. – Новосибирск, 2013. – 790 с.
7. Гамзиков Г.П. Азот в земледелии Западной Сибири. – М.: Наука, 1981. – 266 с.
8. Буджапов Л.В. Биокинетический цикл азота и оборот азотных пулов. – М.: ВНИИА, 2019. – 288 с.

CHESTNUT SOIL FERTILITY MANAGEMENT AND FORECASTING SPRING WHEAT YIELD SCENARIOS: DIGITAL BASE, STATISTICS AND DIAGNOSTIC MODELS

(according to data of long-term field experiment part of Geographical network of experiments with fertilizers)

L.V. Budzhapov, A.K. Ulanov, A.S. Biltuev

Buryat Research Institute of Agriculture, Tretiakova ul. 25z, 670045 Ulan-Ude, Russia, e-mail: burnish@inbox.ru

In a long-term stationary field experiment with fertilizers in the format of the Geographic Network on chestnut soil (registration No. 100), based on the data of fifty years of research, a digital database was formed on the change in key indicators of soil fertility over time under a systematic load of mineral and organic fertilizers in arid regimes of the dry steppe of Buryatia. Based on the results of statistical analysis and mathematical modeling, “keys” have been proposed to diagnose changes in the humus state and nitrogen fund of the soil when applying different combinations and combinations of fertilizers in the current and tactical anticipation with an assessment of speed changes. Prolonged filling of kinetic characteristics with conjugated parameters makes it possible to build the management of the fertility of these fragile soil systems of dry steppe through predictive models when changing quantitative parameters. The variability of the impact of fertilizers in their systematic manifestation makes it possible to significantly expand the panorama of diagnostics and management of soil fertility and reveal large-scale quantitative and kinetic changes over time. Based on a long series of observations on the response of spring grain crops to the intake of a whole spectrum of mineral and organic fertilizers, various scenarios have been formed for predicting the yield of spring wheat for various modes of moisture.

Key words: chestnut soil, long-term field experiment, database of soil fertility, statistical analysis, mathematic modelling, keys of soil fertility management, forecast scenarios of spring wheat harvest.