АГРОХИМИЯ

ГРНТИ 68.33.29

DOI: 10.51886/1999-740X_2026_4_60

Б.М. Амиров[1]*, А. Сейтменбетова[1], Г.А. Сапаров[1], С.О. Базарбаев[1], О.С. Жандыбаев[1]

ОПТИМИЗАЦИЯ ПИТАНИЯ ХЛОПЧАТНИКА НА ЗАСОЛЕННЫХ ПОЧВАХ ТУРКЕСТАНСКОЙ ОБЛАСТИ МЕТОДАМИ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

[1]Казахский научно-исследовательский институт почвоведения и агрохимии имени У.У. Успанова, 050060, Алматы, пр. аль-Фараби, 75В, Казахстан,
**e-mail: bak.amirov@gmail.com*

Аннотация. В статье представлены результаты трехлетнего (2021–2023 гг.) полевого эксперимента и математического моделирования урожайности хлопчатника (*Gossypium hirsutum* L.) в условиях орошаемого земледелия Мактааральского района Туркестанской области (КХ «Сабыр»). Исследования выполнены на светлых среднесуглинистых сероземах с содержанием гумуса 0,44–0,78%, легкогидролизуемого азота 31,4–61,6 мг/кг, подвижного фосфора 22,8–78,0 мг/кг и обменного калия 270–407 мг/кг. Эксперименты проводили на двух фонах засоления: слабом (0,11–0,15%) и среднем–сильном (0,39–0,59%). В опытах варьировали дозы минеральных удобрений: N - 0-150, P_2O_5-0–200 и K_2O-0–120 кг/га. Целью исследования являлась сравнительная оценка точности классических регрессионных моделей, полуэмпирических полиномов и алгоритмов машинного обучения для прогнозирования урожайности хлопка-сырца при совместном влиянии засоления и обеспеченности макроэлементами. В качестве предикторов использовали сумму солей (x_1), а также суммарные запасы почвенных подвижных элементов питания и внесенных доз минеральных удобрений; азота (x_2), фосфора (x_3) и калия (x_4). Моделирование выполняли с применением аналитической регрессионной модели радикального типа и алгоритмов Python (OLS, Ridge, Lasso, Random Forest, Gradient Boosting, SVR, MLP). Адекватность моделей оценивали по результатам ANOVA и метрикам R^2, RMSE, MAE и MAPE. Наибольшую точность продемонстрировал алгоритм Gradient Boosting (R^2=0,994; RMSE=0,104 т/га). Аналитическая радикальная регрессия (R^2=0,838) обеспечила содержательную интерпретацию взаимодействий в системе «почва–удобрение–растение», выявив синергизм азотно-фосфорного питания, компенсирующий негативное влияние засоления, и антагонизм между солями и калием. Полученные модели могут служить основой для цифровых систем управления продукционным процессом хлопчатника на мелиорируемых землях.

Ключевые слова: Gossypium hirsutum L., хлопок-сырец, математическое моделирование, градиентный бустинг, засоление почв, минеральное питание, ионный антагонизм, синергизм.

ВВЕДЕНИЕ

Интенсификация хлопководства в аридных условиях сопряжена с серьезными экологическими и технологическими вызовами. В Туркестанской области Казахстана антропогенная нагрузка и вторичное засоление орошаемых светло-сероземных почв приводят к деградации почвенного покрова, что напрямую снижает его плодородие и потенциал качества продукции. В связи с этим успешное возделывание хлопчатника требует строгого соблюдения зональных агротехнологий. Для противодействия деградации критически важно проведение влагозарядковых и промывочных поливов в сочетании с дифференцированным внесением минеральных удобрений [1–3]. Изучение системы «почва–растение–удобрение» требует объединения полевых опытов с математическим моделированием [4, 5]. Продуктивность хлопчатника неразрывно связана с биохимическими циклами углерода и азота, которые регулируются системой минерального

питания. При этом эффективность усвоения элементов напрямую зависит от генотипических особенностей сорта, определяющих интенсивность фотосинтетического метаболизма и азотного обмена. Кроме того, ключевую роль играют исходные свойства почвы. Например, на орошаемых сероземах применение оптимизированных доз удобрений способствует накоплению органического углерода и общего азота, что предотвращает деградацию плодородия и обеспечивает стабильный урожай. На засоленных землях токсичные ионы блокируют поглощение макроэлементов, сдвигая оптимумы питания и перестраивая работу ионных каналов [6–8].

Продуктивность сельскохозяйственных культур в аридных условиях лимитируется комплексным воздействием абиотических стрессов, среди которых ключевую роль играет засоление почв. Согласно классической модели солеустойчивости, урожайность начинает линейно снижаться только после превышения порогового значения электропроводности почвенного раствора, что требует строгого контроля минерального питания. Эффективность усвоения макро- и микроэлементов в таких условиях напрямую зависит от физиологических механизмов транспорта ионов в ризосфере, которые детально описаны в фундаментальных работах по минеральному питанию высших растений. Оптимизация доз удобрений позволяет компенсировать осмотический стресс и поддерживать метаболическую активность культуры на экономически рентабельном уровне [9-10].

Для прогнозирования отклика культур на комбинированное воздействие дефицита влаги и засоления традиционные линейные модели часто оказываются недостаточно точными из-за нелинейности биологических процессов. В современных агроинформационных системах эту проблему решают с помощью ансамблевых методов машинного обучения. В частности, алгоритм Random Forests демонстрирует высокую устойчивость к переобучению и эффективно выявляет скрытые взаимосвязи между агрометеорологическими параметрами и урожайностью [11]. Альтернативным высокоэффективным подходом является использование Gradient Boosting Machine (GBM), который позволяет итеративно минимизировать ошибку прогноза за счет аппроксимации сложных нелинейных функций отклика растений на стрессовые факторы [12].

Эффективное управление агроценозами в современных условиях требует перехода от усредненных агротехнологий к системам прецизионного земледелия. Масштабные аналитические исследования свидетельствуют о том, что современное состояние и динамика изменения плодородия почв характеризуются выраженной пространственной неоднородностью и локальными тенденциями к дегумификации и дисбалансу элементов питания [13].

Традиционные методы почвенного обследования зачастую не способны в полной мере учесть эту вариабельность. Современное состояние и динамика изменения плодородия почв характеризуются выраженной пространственной неоднородностью, что требует перехода от усредненных агротехнологий к прецизионному земледелию. Как отмечается в комплексных исследованиях, управление производством растениеводческой продукции должно опираться на детальный анализ пространственной вариабельности показателей, влияющих на формирование урожая. В связи с этим для оценки пространственной изменчивости агрохимических показателей все более широкое применение находят методы машинного обучения. Использование

алгоритмов искусственного интеллекта позволяет с высокой степенью точности моделировать и картографировать показатели почвенного плодородия на основе комплексных наборов данных, что служит надежной основой для дифференцированного применения удобрений и сохранения потенциала пашни [14, 15].

Физиологически толерантность к засолению обеспечивается вакуолярной секвестрацией Na^+ и Cl^-, синтезом осмолитов, активностью антиоксидантов и питательными элементами [16-18]. Особое значение имеет калий, регулирующий тургор и защищающий от стресса [19, 20]. Поддержание ионного гомеостаза требует от хлопчатника больших энергозатрат [21, 22]. Ситуация осложняется снижением подвижности фосфора в сероземах, приводящим к фосфорному голоданию [23]. Ресурсосберегающее капельное орошение локализует удобрения, но требует строгого контроля солевых потоков [24].

Опираясь на фундаментальные принципы почвоведения и агрохимии, современные исследования подчеркивают, что для обеспечения экологической устойчивости орошаемых земель Южного Казахстана критически важно учитывать защитную роль калия в условиях абиотического стресса и целенаправленно использовать селекцию корневых признаков (фенов) для оптимизации освоения почвенного профиля и повышения урожайности сельскохозяйственных культур [20, 25-27].

Цель исследований - на основе многофакторных полевых опытов и привлечения аппарата нелинейной регрессии и алгоритмов ML осуществить моделирование продуктивности хлопчатника на засоленных сероземах Туркестанской области с детальной агрохимической интерпретацией эффектов взаимодействия.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Экспериментальную базу исследования составил верифицированный массив данных (n=72), сформированный по результатам полевых и производственных опытов (2021–2023 гг.). Исследования выполнялись в аридных условиях орошаемого агроландшафта Мактааральского района Туркестанской области на базе крестьянского хозяйства «Сабыр». Карта места проведения (43°15′28.6″ N, 68°18′47.2″ E) опытов приведена на рисунке 1.

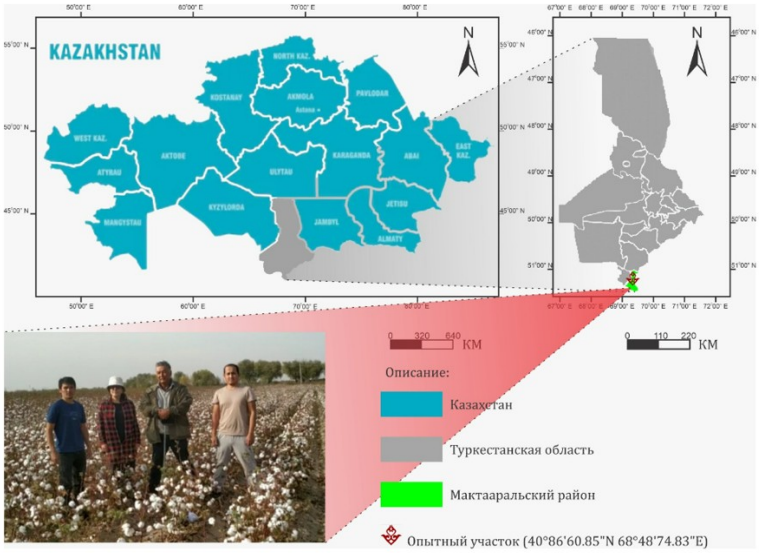


Рисунок 1 – Карта размещения опытного поля хлопчатника

Почвенный покров участков представлен светлыми сероземами (сероземно-луговыми почвами и солончаковатыми комплексами) среднесуглинистого гранулометрического состава, характерными для Южно-Казахстанской мелиоративной зоны.

Схема эксперимента предусматривала варьирование эффективных запасов питания и доз минеральных туков в широких диапазонах. В пахотном горизонте (0–25 см) суммарные запасы питательных элементов с учетом внесенных удобрений характеризовались следующими значениями: азота составляло 102-200 кг/га, подвижного фосфора – 74-254 кг/га, обменного калия – 921-1322 кг/га. В зависимости от концентрации водорастворимых солей в профиле (0–25 см) и степени исходного сульфатно-хлоридного и хлоридно-сульфатного засоления выделялись два контрастных фона: слабозасоленный (сумма солей 0,13–0,23%) и среднесильнозасоленный (0,39–0,59%).

В качестве результирующего признака (отклика Y) принята фактическая урожайность хлопка-сырца (Gossypium hirsutum L.), выраженная в т/га. Система независимых предикторов включала четыре базовых фактора:

x_1 - сумма солей (%), выступающая индикатором галогемного статуса;

x_2 - суммарный запас азота (кг/га), объединяющий легкогидролизуемые формы по методу Тюрина-Кононовой и внесенные дозы (107–350 кг/га);

x_3 - суммарный запас фосфора (кг/га), учитывающий подвижный фосфатный фонд по Мачигину и дозы удобрений (74–404 кг/га);

x_4 - суммарный запас калия (кг/га), включающий обменный калий в углеаммонийной вытяжке и калийные удобрения (921–1442 кг/га).

Для математической формализации нелинейного отклика растений и бинарных эффектов сопряженного действия факторов исходная матрица предикторов была подвергнута радикальным преобразованиям и расчету комбинированных признаков. Оптимизация структуры аналитического полиномиального уравнения строилась на основе алгоритма пошагового исключения с жестким пороговым уровнем значимости $p<0,05$. Параллельно на идентичной выборке в среде Python 3.11 с использованием библиотек scikit-learn и statsmodels проведено обучение пула моделей машинного обучения (ML): классической линейной регрессии (OLS), гребневой (Ridge) и Лассо (Lasso) регрессий, случайного леса (Random Forest), градиентного бустинга (Gradient Boosting), метода опорных векторов (SVR) и многослойного перцептрона (MLP). Для регуляризованных и нейросетевых алгоритмов осуществлялось предварительное Z-масштабирование признаков (StandardScaler) с целью демпфирования разности их размерностей. Сравнение точности и генерализующей способности построенных систем осуществлялось на основе многокритериального анализа по комплексу статистических метрик: коэффициенту множественной корреляции (R), коэффициенту детерминации (R^2), скорректированному R^2 (Adj. R^2), средней квадратичной ошибке (RMSE), средней абсолютной ошибке (MAE) и средней абсолютной ошибке в процентах (MAPE).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Оценка прогностической эффективности математических моделей.

Сравнение точности аппроксимации обученных моделей показало явное преимущество нелинейных подходов и алгоритмов машинного обучения над классическими линейными структурами (таблица 1).

Таблица 1 - Сравнительные метрики качества регрессионных моделей и алгоритмов машинного обучения

Модель / Алгоритм	Множественный R	R^2	RMSE, т/га	MAE, т/га	MAPE, %
Градиентный бустинг (Boosting)	0,9969	0,9937	0,1036	0,0745	1,82
Случайный лес (Random Forest)	0,9916	0,9809	0,1801	0,1438	3,51
Метод опорных векторов (SVR)	0,9817	0,9625	0,2527	0,1660	4,08
Нейросеть (Перцептрон MLP)	0,9715	0,9427	0,3121	0,2401	5,94
Радикальный полином 0,5	0,9154	0,8380	0,5249	0,4175	10,13
Линейная регрессия (OLS)	0,8238	0,6787	0,7391	0,6188	15,22
Гребневая регрессия (Ridge)	0,8238	0,6786	0,7393	0,6189	15,24
Лассо регрессия (Lasso)	0,8199	0,6604	0,7599	0,6204	15,70

Линейная модель (OLS) показала низкую точность (R^2=0,6787) из-за игнорирования ионного синергизма и антагонизма, что подтверждает нелинейность откликов системы на солевой стресс. В свою очередь, ансамбли деревьев решений (Random Forest, Gradient Boosting) достигли максимальной точности (R2=0,9937, RMSE} = 0,1036 т/га) за счет улавливания скрытых связей высокого порядка, но работают по принципу «черного ящика». Разработанный полуэмпирический радикальный полином занял оптимальное промежуточное положение (R^2=0,8380, MAPE=10,13%): он продемонстрировал лучший результат среди строго интерпретируемых математических структур, сохранив физический смысл каждого уравнения (рисунок 2).

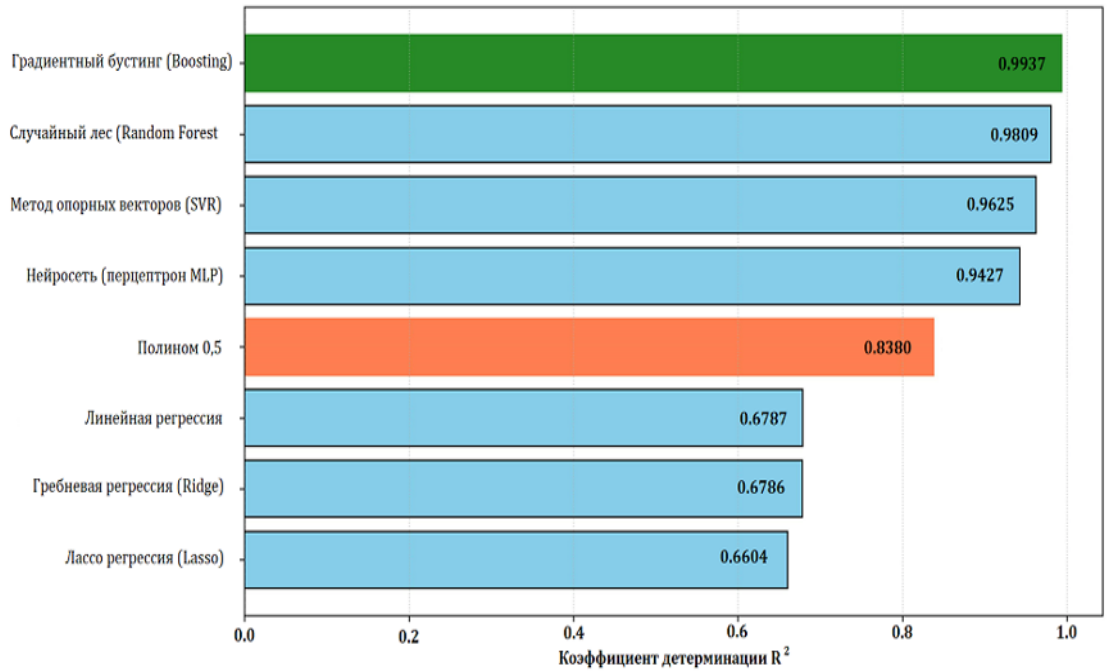


Рисунок 2 – Сравнительный анализ коэффициентов детерминации (R^2) моделей регрессии и машинного обучения на полных данных

Дисперсионный анализ и спецификация нелинейной модели.

Глобальная статистическая значимость выделенных 9 признаков радикального полинома проверялась с помощью классической процедуры дисперсионного анализа (таблица 2).

Таблица 2 - Результаты дисперсионного анализа (ANOVA) нелинейной регрессионной модели

Источник вариации	Степени свободы (df)	Сумма квадратов (Sum Sq)	Средние квадраты (Mean%20Sq)	F-критерий Фишера	Значимость (Prob>F)
Регрессия	9	102,5970	11,3997	35,6316	$3{,}138 \times 10^{-21}$
Остаток	62	19,8357	0,3199	-	-
Общая	71	122,4327	-	-	-

Расчетное значение критерия Фишера (F=35,63) многократно превышает табличные квантили при критическом уровне значимости, а величина p-value (3,138x10-21) констатирует строгую регулярность и неслучайный характер полученной зависимости.

Визуальный анализ совмещенных трендов эмпирических значений урожайности хлопка-сырца (Y) и теоретических расчетов, выполненных по разработанной радикальной полиномиальной модели, демонстрирует высокую степень их синхронности на всем протяжении выборки (рисунок 3).

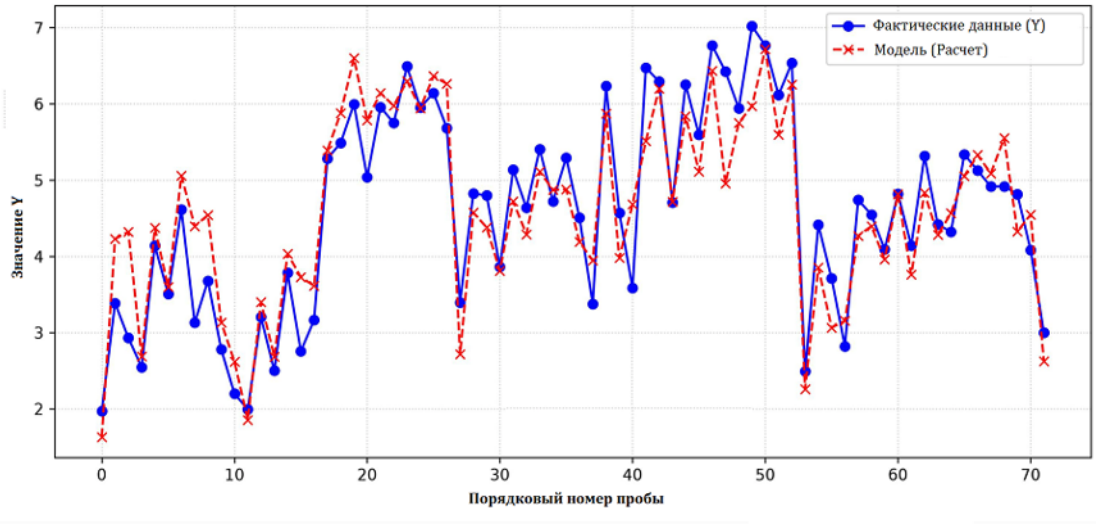


Рисунок 3 – Сопоставление фактических значений урожайности хлопка-сырца с теоретическим трендом нелинейной модели регрессии по номерам проб

Теоретическая кривая на рисунке 3 с высокой точностью повторяет экстремумы фактической урожайности. Локальные расхождения носят хаотический характер без системного смещения, что визуально подтверждает сбалансированность уравнения. Эмпирическое уравнение множественной регрессии имеет вид:

$$Y=44{,}517 + 13{,}2745x_1 + 3{,}4077x_2^{0,5} + 0{,}0938x_4 - 4{,}1111x_4^{0,5} + 0{,}9472(x_1x_2)^{0,5} + 0{,}8562\ (x_1x_3)^{0,5} - 1{,}4502(x_1x_4)^{0,5} - 0{,}0276\ (x_2x_3)^{0,5} - 0{,}0897(x_2x_4)^{0,5}.$$

Проверка уравнения по критерию Фишера подтвердила его высокую глобальную значимость (F=35,63, p<0,001).

Параметры локальной значимости отдельных членов уравнения представлены в таблице 3.

Таблица 3 - Параметры нелинейного уравнения регрессии урожайности хлопка-сырца

Переменная	Коэффициент	Стандартная ошибка	t-критерий Стьюдента	Значимость (P>‖t‖)
Свободный член	44,5170	31,8164	1,40	0,1667
x_1	13,2745	5,8320	2,28	0,0263
$x_2^{0,5}$	3,4077	1,0337	3,30	0,0016
x_4	0,0938	0,0240	3,90	0,0002
$x_4^{0,5}$	-4,1111	1,7089	-2,41	0,0191
$(x_1x_2)^{0,5}$	0,9472	0,4034	2,35	0,0221
$(x_1x_3)^{0,5}$	0,8562	0,1820	4,70	0,0000
$(x_1x_4)^{0,5}$	-1,4502	0,2561	-5,66	0,0000
$(x_2x_3)^{0,5}$	-0,0276	0,0069	-3,98	0,0002
$(x_2x_4)^{0,5}$	-0,0897	0,0337	-2,66	0,0099

Поле рассеяния на рисунке 4 наглядно характеризует прогностический потенциал радикального полинома.

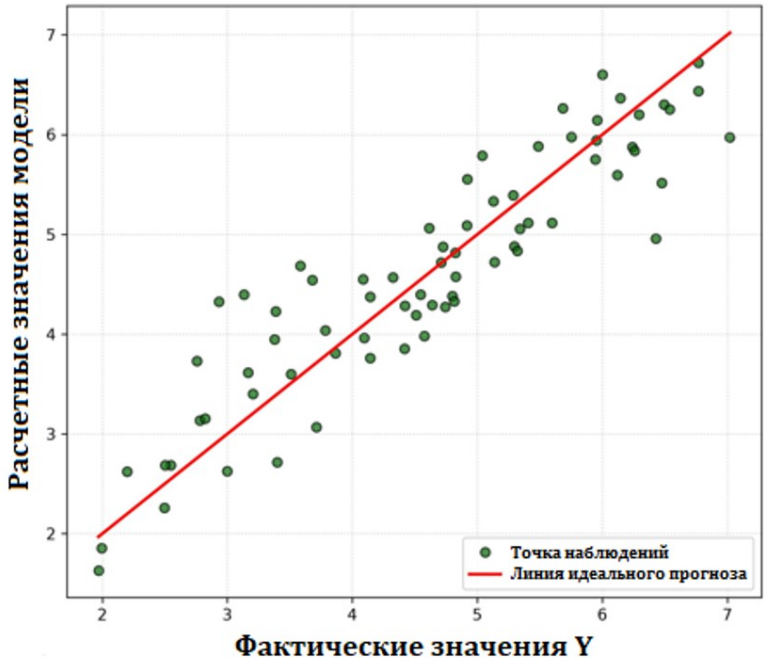


Рисунок 4 – Диаграмма рассеяния фактических и расчетных значений урожайности для нелинейной радикальной модели регрессии

Точки наблюдений плотно группируются вдоль линии идеального прогноза без деформаций на краях, что доказывает адекватность радикального преобразования предикторов ($x_i^{0,5}$). Для проверки гомоскедастичности случай-

ных погрешностей построен график распределения остатков в зависимости от предсказанной урожайности (рисунок 5).

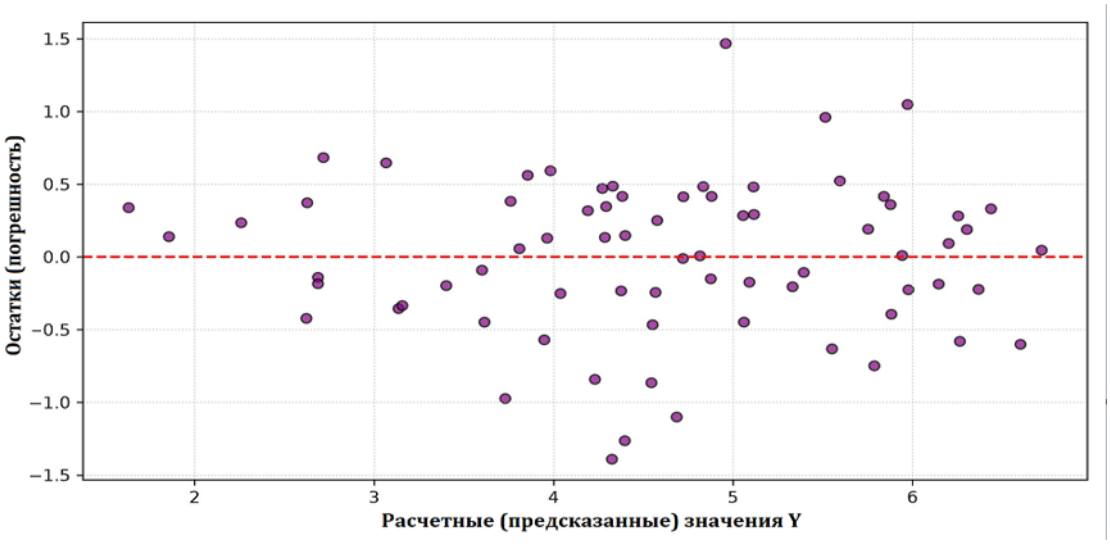


Рисунок 5 – Распределение остатков нелинейной регрессии по величине расчетных значений урожайности хлопка-сырца

Как показано на рисунке 4, ошибки аппроксимации хаотично рассеяны в пределах горизонтальной полосы от -1,5 до +1,5 т/га относительно нулевой линии (математического ожидания остатков). Отсутствие четких геометрических паттернов (таких как расширяющийся конус) свидетельствует о выполнении свойства гомоскедастичности: дисперсия остатков постоянна на всем интервале моделирования, что гарантирует несмещенность и состоятельность оценок.

Детальный анализ закона распределения случайных ошибок регрессионной модели выполнен с помощью квантильного графика (Q-Q Plot) и гистограммы плотности распределения ошибок (рисунок 6А, 6Б).

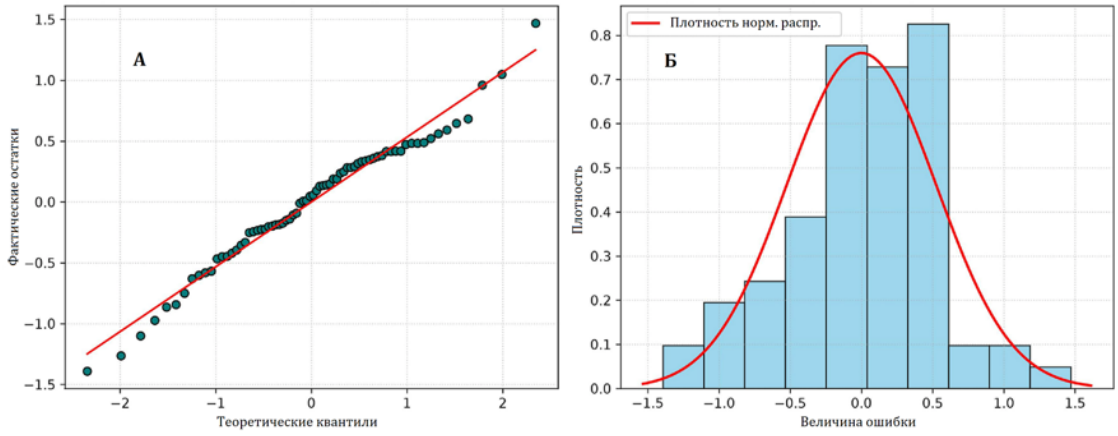


Рисунок 6 – Статистический анализ распределения ошибок аппроксимации: А) Квантильный график (Q-Q Plot); Б) Гистограмма плотности распределения остатков

Квантильный график и гистограмма (рисунок 6А, Б) показывают, что остатки симметричны, центрированы относительно нуля и аппроксимируются кривой Гаусса с незначительными флуктуациями на хвостах. Нормальное распределение ошибок доказывает правомерность применения параметрических критериев для оценки значимости параметров уравнения.

Научно-агрохимическая интерпретация эффектов взаимодействия.

Анализ полученного полинома раскрывает механизмы адаптации хлопчатника к условиям среды. Включение азотного фактора $x_2^{0,5}$ (β=+3,4077, p=0,0016) согласуется с принципом затухания отклика: скорость нарастания урожая падает с ростом концентрации из-за лимитирования другими факторами. Топология калийного фактора - комбинация линейного (+0,0938, p=0,0002) и радикального (−4,1111, p=0,0191) членов - показывает, что при низких дозах калий стабилизирует водный баланс, но его избыток вызывает физиологическую депрессию из-за падения градиента потенциалов на корневой мембране [20]. Коэффициенты при $(x_1x_2)^{0,5}$ (+0,9472, p=0,0221) и $(x_1x_3)^{0,5}$ (+0,8562, p=0,0000) подтверждают положительный синергизм азота, фосфора и солевого фактора. Азот активирует синтез пролина, стрессовых белков и осмопротекторов (глицин-бетаина), снижая осмотический шок [16]. Фосфор компенсирует блокирование фосфатов карбонатами и солями [20], интенсифицирует рост боковых корней и обеспечивает клеткам энергию АТФ для активного транспорта ионов [10, 17, 23, 27]. Напротив, член соле-калийного взаимодействия $(x_1x_4)^{0,5}$ имеет отрицательный коэффициент (−1,4502, p=0,0000). По данным исследователей это проявление катионного антагонизма (Na^+) и (K^+) в почвенно-поглощающем комплексе и ионных каналах: избыток натрия блокирует калиевые каналы, из-за чего эффективность калийных туков резко падает, а их внесение лишь увеличивает осмотический токсикоз [20-22]. Отрицательные знаки при взаимодействии азота с фосфором -0,0276 при $(x_2x_3)^{0,5}$ и калием -0,0897 при $(x_2x_4)^{0,5}$ отражают закон сбалансированности питания [26]: несбалансированный избыток NPK смещает pH почвы, переводит элементы в недоступные формы и вызывает «жирование» культуры, затягивая вегетацию [25]. Таким образом, максимальную прогностическую точность обеспечил градиентный бустинг (R^2 = 0,9937, RMSE = 0,1036 т/га), а нелинейная полиномиальная модель (R^2=0,8380, F=35,63) вскрыла механизмы взаимодействия факторов. Достижение максимальной урожайности на засоленных землях требует не шаблонного наращивания удобрений, а расчета пропорций NPK с учетом ионно-солевого состава конкретного участка (включая дробление или внекорневое внесение калия).

ВЫВОДЫ

1. Ансамблевый алгоритм градиентного бустинга показал максимальную эффективность в прецизионном прогнозировании урожайности хлопчатника (R^2=0,9937, RMSE=0,1036 т/га), выступая надежным цифровым инструментом для агрохимического планирования.

2. Разработанная нелинейная полиномиальная модель (R^2=0,8380, F=35,63) позволила вскрыть тонкие механизмы мелиоративного взаимодействия факторов: доказан синергетический защитный эффект азотно-фосфорного питания по отношению к солевому стрессу, а также подтвержден жесткий катионный антагонизм между калием и почвенными солями (-1,4502).

3. Достижение максимальной продуктивности хлопчатника на засоленных землях Туркестанской области невозможно путем шаблонного наращивания доз минеральных туков. Необходим строгий дифференцированный

расчет сбалансированных пропорций ионно-солевому статусу каждого NPK, адаптированных к конкретному производственного контура.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Данная статья опубликована в рамках программно-целевого финансирования научных исследовании Министерства сельского хозяйства на 2021-2023 годы по программе ИРН BR10764865 «Научно-технологическое обеспечение сохранения и воспроизводства плодородия земель сельскохозяйственного назначения».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Умбетаев И. Технология возделывания новых отечественных сортов хлопчатника на юге Казахстана: монография. - Алматы, 2005. - 144 с.

2. Умбетаев И., Джаланкузов Т., Тагаев А., Сулейменов Б. Влияние питательного и водного режима на урожай хлопчатника // Почвоведение и агрохимия. - 2008. - № 1. - С. 90-94.

3. Аширбеков М. Ж., Дридигер В. К., Батькаев Ж. Я. Урожайность хлопчатника в зависимости от сроков и норм внесения фосфорных удобрений на орошаемых сероземах Южного Казахстана // Нива Поволжья. - 2018. - № 2. - С. 73-80.

4. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта. - М.: Альянс, 2014. - 352 с.

5. Полуэктов Р.А., Смоляр Э.И., Терлеев В.В., Топаж А.Г. Моделирование продукционного процесса сельскохозяйственных культур. - СПб.: Изд-во С.-Петерб. ун-та, 2002. - 392 с.

6. Маннанова Р.Н. Превращение азота в почве, его использование хлопчатником, величина и качество урожая при различных условиях питания: дис. ... канд. с.-х. наук. - Ташкент, 1984. - 130 с.

7. Обидов К. А. Продуктивность новых сортов хлопчатника в зависимости от густоты стояния и норм минеральных удобрений: дис. ... канд. с.-х. наук. - Душанбе, 2012. - 115 с.

8. Умбетаев И. Динамика биологической активности сероземов в связи с различной глубиной основной обработки почвы // Почвоведение и агрохимия. - 2010. - № 2. - С. 40-41.

9. Maas E.V., Hoffman G.J. Crop salt tolerance // Journal of the Irrigation and Drainage Division. - 1977. - Т. 103. - № 2. - P. 115-134.

10. Marschner H. Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants. - 3rd ed. - London: Academic Press, 2012. - 651 p.

11. Breiman L. Random forests// Machine Learning. - 2001. - Т. 45. - № 1. - P. 5-32.

12. Friedman J.H. Greedy function approximation: A gradient boosting machine// The Annals of Statistics. - 2001. - Т. 29. - № 5. - P. 1189-1232.

13. Сычев В.Г., Лунев М.И., Павлихина А.В. Современное состояние и динамика изменения плодородия почв Российской Федерации // Плодородие. - 2022. -№ 1. - С. 2-7.

14. Чинилин А.В., Савин И.Ю. Крупномасштабное цифровое картографирование содержания органического углерода почв с помощью методов машинного обучения// Бюллетень Почвенного института им. В. В. Докучаева. - 2018. - № 95. - С. 3-25.

15. Якушев В.П., Якушев В.В., Блохина С.Ю., Блохин Ю.И., Матвеенко Д.А. Точное земледелие: комплексный подход к управлению производством растениеводческой продукции и анализу пространственной вариабельности // Вестник Российской академии наук. - 2023. - Т. 93. - № 10. - С. 955-969.

16. Munns R., Tester M. Mechanisms of salinity tolerance // Annual Review of Plant Biology. - 2008. - Т. 59. - P. 651-681.

17. Hawkesford M., Horst W., Kichey T., Lambers H., Schjoerring J., Møller I.S., White P. Functions of macronutrients// Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants / Ed. by P. Marschner. - 3rd ed. - London: Academic Press, 2012. - P. 135-189.

18. Läuchli A., Epstein E. Mechanisms of salt tolerance in plants // California Agriculture. - 1984. - Т. 38. - № 10. - P. 20-22.

19. Прокошев В. В., Дерюгин И. П. Калий и калийные удобрения. - М.: Ледум, 2000. - 185 с.

20. Wang M., Zheng Q., Shen Q., Guo S. The critical role of potassium in plant stress response // International Journal of Molecular Sciences. - 2013.-Т.14.-№4.- P. 7370-7390.

21. Flowers T. J., Colmer T. D. Salinity tolerance in halophytes // New Phytologist. - 2008. - Т. 179. - № 4. - P. 945-963.

22. Zhu J.K. Regulation of ion homeostasis under salt stress // Current Opinion in Plant Biology. - 2003. - Т. 6. - № 5. - P. 441-445.

23. Умбетов А.К., Балгабаев А.М., Шибикеева А.М., Жаксыбаева Г.С. Динамика минеральных и органических фосфатов в различных типах почв предгорной зоны Заилийского Алатау в процессе естественного и антропогенного воздействия // Почвоведение и агрохимия. - 2019. - № 2. - С. 64-74.

24. Новикова А.В., Цой З.И. Капельное орошение хлопчатника // Сборник научных трудов САНИИРИ им. В. Д. Журина. - Ташкент, 2004. - С. 356-359.

25. Ганжара Н.Ф. Почвоведение. - М.: Агроконсалт, 2001. - 392 с.

26. Шеуджен А.Х. Агрохимия. - Майкоп: Адыгея, 2003. - 640 с.

27. Lynch J.P. Root phenes for enhanced soil exploration and phosphorus acquisition: Tools for future crops // Plant Physiology. - 2011.-Т.156.-№3.- P. 1041-1049.

REFERENCES

1. Umbetaev I. Technology of cultivating new domestic cotton varieties in the South of Kazakhstan: monograph. - Almaty, 2005. - 144 p.

2. Umbetaev I., Dzhalankuzov T., Tagaev A., Suleimenov B. Influence of nutritional and water regimes on cotton yield // Soil Science and Agrochemistry. - 2008. - No. 1. - P. 90-94.

3. Ashirbekov M.Zh., Dridiger V.K., Batkaev Zh.Ya. Cotton yield depending on the timing and rates of phosphorus fertilizer application on irrigated sierozems of Southern Kazakhstan // Niva Povolzhya. - 2018. - No. 2. - P. 73-80.

4. Dospekhov B.A. Methodology of field experiments. - M.: Alyans, 2014. - 352 p.

5. Poluektov R.A., Smolyar E.I., Terleev V.V., Topazh A.G. Modeling the production process of agricultural crops. - St. Petersburg: St. Petersburg State University Publishing House, 2002. - 392 p.

6. Mannanova R.N. Transformation of nitrogen in the soil, its utilization by cotton, and the quantity and quality of the yield under various nutritional conditions: dissertation for the degree of Candidate of Agricultural Sciences. – Tashkent, 1984. – 130 p.

7. Obidov K.A. Productivity of new cotton varieties depending on plant density and rates of mineral fertilizers: dissertation for the degree of Candidate of Agricultural Sciences. – Dushanbe, 2012. – 115 p.

8. Umbetaev I. Dynamics of biological activity of sierozems in relation to different depths of primary soil tillage // Soil Science and Agrochemistry. - 2010. - No. 2. - P. 40-41.

9. Maas E. V., Hoffman G. J. Crop salt tolerance // Journal of the Irrigation and Drainage Division. - 1977. - Vol. 103. - No. 2. - P. 115-134.

10. Marschner H. Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants. - 3rd ed. - London: Academic Press, 2012. - 651 p.

11. Breiman L. Random forests // Machine Learning. - 2001. - Vol. 45. - No. 1. - P. 5-32.

12. Friedman J.H. Greedy function approximation: A gradient boosting machine // The Annals of Statistics. - 2001. - Vol. 29. - No. 5. - P. 1189-1232.

13. Sychev V.G., Lunev M.I., Pavlikhina A.V. Current state and dynamics of soil fertility changes in the Russian Federation // Soil Fertility. - 2022. - No. 1. - P. 2-7.

14. Chinilin A. V., Savin I. Yu. Large-scale digital mapping of soil organic carbon content using machine learning methods // Bulletin of the V.V. Dokuchaev Soil Institute. - 2018. - No. 95. - P. 3-25.

15. Yakushev V.P., Yakushev V.V., Blokhina S.Yu., Blokhin Yu.I., Matveenko D.A. Precision agriculture: A comprehensive approach to managing crop production and analyzing spatial variability // Herald of the Russian Academy of Sciences. - 2023. - Vol. 93. - No. 10. - P. 955-969.

16. Munns R., Tester M. Mechanisms of salinity tolerance // Annual Review of Plant Biology. - 2008. - Vol. 59. - P. 651-681.

17. Hawkesford M., Horst W., Kichey T., Lambers H., Schjoerring J., Møller I. S., White P. Functions of macronutrients // Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants / Ed. by P. Marschner. - 3rd ed. - London: Academic Press, 2012. - P. 135-189.

18. Läuchli A., Epstein E. Mechanisms of salt tolerance in plants // California Agriculture. - 1984. - Vol. 38. - No. 10. - P. 20-22.

19. Prokoshev V.V., Deryugin I.P. Potassium and potassium fertilizers. - M.: Ledum, 2000. - 185 p.

20. Wang M., Zheng Q., Shen Q., Guo S. The critical role of potassium in plant stress response // International Journal of Molecular Sciences. - 2013. - Vol. 14. - No. 4. - P. 7370-7390.

21. Flowers T.J., Colmer T.D. Salinity tolerance in halophytes // New Phytologist. - 2008. - Vol. 179. - No. 4. - P. 945-963.

22. Zhu J. K. Regulation of ion homeostasis under salt stress // Current Opinion in Plant Biology. - 2003. - Vol. 6. - No. 5. - P. 441-442.

23. Umbetov A.K., Balgabayev A.M., Shibikeeva A.M., Zhaksybaeva G.S. Dynamics of mineral and organic phosphates in various soil types of the foothill zone of the Zailiysky Alatau under natural and anthropogenic impacts // Soil Science and Agroche-mistry. - 2019. - No. 2. - P. 64-74.

24. Novikova A.V., Tsoy Z.I. Drip irrigation of cotton // Collection of Scientific Works of SANIIRI named after V. D. Zhurin. - Tashkent, 2004. - P. 356-359.

25. Ganzhara N.F. Soil Science. - M.: Agroconsult, 2001. - 392 p.

26. Sheudzhen A.Kh. Agrochemistry. - Maykop: Adygeya, 2003. - 640 p.

27. Lynch J.P. Root phenes for enhanced soil exploration and phosphorus acquisition: Tools for future crops // Plant Physiology. - 2011. - Vol. 156. - No. 3. - P. 1041-1049.

ТҮЙІН

Б.М. Амиров[1]*, Ғ.А. Сапаров[1], А.Т. Сейтменбетова[1], С.О. Базарбаев[1], Ө.С. Жандыбаев[1]

ТҮРКІСТАН ОБЛЫСЫНЫҢ ТҰЗДАНҒАН ТОПЫРАҚТАРЫНДА МАШИНАМЕН ОҚЫТУ ӘДІСТЕРІМЕН МАҚТАНЫҢ ҚОРЕКТЕНУІН ОҢТАЙЛАНДЫРУ

*[1]Ө.О. Оспанов атындағы Қазақ топырақтану және агрохимия ғылыми-зерттеу институты, 050060, Алматы, әл-Фараби даңғылы, 75В, Қазақстан, *e-mail: bak.amirov@gmail.com*

Бұл мақалада Түркістан облысының Мақтаарал ауданындағы «Сабыр» шаруа қожалығы жағдайында суармалы егіншілік жүйесінде 2021–2023 жылдары жүргізілген үш жылдық далалық тәжірибелердің нәтижелері негізінде мақта (Gossypium hirsutum L.) өнімділігін математикалық модельдеу ұсынылған. Зерттеулер қарашірік мөлшері 0,44–0,78%, жеңіл гидролизденетін азот 31,4–61,6 мг/кг, жылжымалы фосфор 22,8–78,0 мг/кг және алмаспалы калий 270–407 мг/кг болатын жеңіл орташа саздақты сұр топырақтарда жүргізілді. Тәжірибелер тұздану деңгейі бойынша екі түрлі фонда орындалды: әлсіз тұзданған (ерігіш тұздардың жалпы мөлшері 0,11–0,15%) және орташа–күшті тұзданған (0,39–0,59%). Минералдық тыңайтқыштардың мөлшері N – 0–150, P_2O_5 – 0–200 және K_2O – 0–120 кг/га аралығында өзгертілді. Зерттеудің мақсаты – топырақтың тұздануы мен макроэлементтермен қамтамасыз етілуінің бірлескен әсері жағдайында шитті мақта өнімділігін болжауда классикалық регрессиялық модельдердің, жартылай эмпирикалық полиномдардың және машиналық оқыту алгоритмдерінің болжамдық дәлдігін салыстырмалы бағалау. Болжаушы айнымалылар ретінде ерігіш тұздардың жалпы мөлшері (x_1), азот (x_2), фосфор (x_3) және калийдің (x_4) жиынтық қоры пайдаланылды. Модельдеу аналитикалық радикалдық регрессия теңдеуі және Python ортасындағы OLS, Ridge, Lasso, Random Forest, Gradient Boosting, SVR және MLP алгоритмдері арқылы жүргізілді. Модельдердің сапасы дисперсиялық талдау (ANOVA) және R^2, RMSE, MAE, MAPE статистикалық көрсеткіштері бойынша бағаланды. Ең жоғары болжамдық дәлдікті Gradient Boosting алгоритмі көрсетті (R^2=0,994; RMSE=0,104 т/га). Ал радикалдық регрессияның аналитикалық моделі (R^2=0,838) «топырақ–тыңайтқыш–өсімдік» жүйесіндегі өзара әрекеттесулерді ғылыми тұрғыдан түсіндіруге мүмкіндік беріп, азот пен фосфор қоректенуінің тұздану әсерін әлсірететін синергиялық ықпалын және тұздар мен калий арасындағы антагонистік байланысты анықтады. Алынған сызықтық емес модельдер тұзданған суармалы жерлерде мақта өсірудің дәлме-дәл қоректендіру жүйелері мен цифрлық шешім қабылдау технологияларын әзірлеудің ғылыми негізі болып табылады.

Түйінді сөздер: Gossypium hirsutum L., шикізат мақта, математикалық модельдеу, градиентті бустинг, топырақтың сортаңдануы, минералды қоректену, иондық антагонизм, синергизм.

SUMMARY

B.M. Amirov[1*], G.A. Saparov[1], A.T. Seitmenbetova[1], S.O. Bazarbayev[1], O.S. Zhandybayev[1]

OPTIMIZATION OF COTTON NUTRITION ON SALINE SOILS OF THE TURKESTAN REGION USING MACHINE LEARNING METHODS

*[1]Kazakh Research Institute of Soil Science and Agrochemistry named after U.U. Uspanov, 050060, Almaty, Al-Farabi ave., 75B, Kazakhstan, *e-mail: bak.amirov@gmail.com*

The article presents the results of a three-year (2021–2023) field experiments and mathematical modeling of cotton (Gossypium hirsutum L.) productivity under irrigated agricultural conditions in the Maktaaral District of the Turkestan Region (Kazakhstan) at the "Sabyr" farm. The experimental plots were located on light medium-loamy sierozem soils characterized by 0.44–0.78% organic matter, 31.4–61.6 mg kg^{-1} hydrolyzable nitrogen, 22.8–78.0 mg kg^{-1} available phosphorus, and 270–407 mg kg^{-1} exchangeable potassium. The study was conducted under two contrasting salinity levels: low (0.11–0.15% total soluble salts) and moderate-to-high

(0.39–0.59%). Mineral fertilizer rates varied within the following ranges: N, 0–150; P_2O_5, 0–200; and K_2O, 0–120 kg ha^{-1}. The objective was to compare the predictive performance of conventional regression models, semi-empirical polynomial equations, and machine learning algorithms for forecasting seed cotton yield under the combined effects of soil salinity and macroelement availability. The predictor variables included total soluble salts (x_1), total nitrogen reserves (x_2), phosphorus reserves (x_3), and potassium reserves (x_4). Modeling was performed using an analytical radical regression equation and several Python-based algorithms (OLS, Ridge, Lasso, Random Forest, Gradient Boosting, SVR, and MLP). Model performance was evaluated using ANOVA and the statistical metrics R^2, RMSE, MAE, and MAPE. Gradient Boosting demonstrated the highest predictive accuracy (R^2=0.994; RMSE=0.104 t ha^{-1}). The analytical radical regression model (R^2=0.838) provided an interpretable description of soil–fertilizer–plant interactions, revealing synergistic effects of nitrogen and phosphorus nutrition that mitigate salinity stress, as well as antagonistic interactions between soil salts and potassium. The developed nonlinear models provide a scientific basis for precision nutrient management and digital decision-support systems for cotton production on irrigated saline soils.

Keywords: Gossypium hirsutum L., seed cotton, mathematical modeling, gradient boosting, soil salinity, mineral nutrition, ionic antagonism, synergism.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

1. Амиров Бахытбек Мустафаулы - заведующий отделом агрохимии, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, https://orcid.org/0000-0002-4712-9018, e-mail: bak.amirov@gmail.com

2. Сапаров Галымжан Абдуллаевич - заведующий отделом экологии, кандидат сельскохозяйственных наук, https://orcid.org/0000-0002-6392-2032, e-mail: saparov.g@mail.ru

3. Сейтменбетова Аксауле - ведущий научный сотрудник, кандидат биологических наук, e-mail: seytmenbetova77@mail.ru

4. Базарбаев Султан Оразбаевич - младшии научный сотрудник отдела агрохимии, PhD,https://orcid.org/0009-0006-3590-0625, e-mail: sultan-13_01@mail.ru

5. Жандыбаев Оркен Серпинулы - младшии научный сотрудник отдела агрохимии, PhD, https://orcid.org/0000-0002-8544-8992, e-mail: mr.orken@yandex.kz