

## АГРОХИМИЯ

ГРНТИ 68.33.29

DOI: 10.51886/1999-740X\_2026\_2\_35

Б.М. Амиров<sup>1\*</sup>, С.О. Базарбаев<sup>1</sup>, О.С. Жандыбаев<sup>1</sup>**МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ НА ФОРМИРОВАНИЕ СИЛОСНОЙ БИОМАССЫ КУКУРУЗЫ В УСЛОВИЯХ ЗАСОЛЁННЫХ ПОЧВ ЮГА КАЗАХСТАНА**

<sup>1</sup>Казахский научно-исследовательский институт почвоведения и агрохимии имени У.У. Успанова, 050060, Алматы, ул. Байрак, 10, Казахстан,

\*e-mail: bak.amirov@gmail.com

*Аннотация.* В статье представлены результаты полевых исследований по оценке влияния доз и соотношений минеральных удобрений на урожайность силосной массы кукурузы в условиях различной степени засоленности почв юга Казахстана. Исследования проведены на светлых серозёмах Отырарского района Туркестанской области на двух фонах засоленности почвы (0,13 и 0,59% суммы солей). Объектом изучения служил гибрид кукурузы *Gladius F1* (FAO 700). Изучались дозы удобрений в диапазоне N0–150, P0–120, K0–90. Оценивались биометрические показатели, урожайность силосной массы, а также экономическая эффективность применения удобрений. Установлено, что на слабозасоленных почвах применение минеральных удобрений обеспечивало достоверное повышение урожайности силосной массы кукурузы до 84,5–90,7 т/га, что на 41,4–56,5% выше контроля. При средней засоленности продуктивность снижалась более чем в 2 раза, а эффективность высоких доз азота уменьшалась вследствие усиления солевого стресса. С использованием многомерного регрессионного анализа получена модель с высокой степенью достоверности ( $R^2=0,993$ ;  $F=586,94$ ;  $p < 0,001$ ), подтверждающая доминирующее отрицательное влияние засоления и нелинейный характер отклика культуры на удобрения. На слабо засоленных почвах экономически оправдано применение минеральных удобрений в дозах N100–150, P80, K30–60 кг д.в./га, что обеспечивает максимальную прибыль (до 1194 тыс. тг/га) и рентабельность 270–300%. На средне засоленных почвах оптимальной является система умеренного удобрения N50P80K30–60, позволяющая сохранить положительную рентабельность при минимальных рисках потери урожая. Для обеих степеней засоления отмечено, что фосфорно-калийное питание играет защитную роль, повышая устойчивость кукурузы к засолению, тогда как избыточное азотное питание без фосфора снижает экономическую эффективность. Полученные результаты подтверждают необходимость дифференцированного и адаптивного подхода к системе удобрения кукурузы на силос с учетом степени засоления почв.

*Ключевые слова:* кукуруза, силосная масса, засоленные почвы, минеральные удобрения, урожайность, моделирование, экономическая эффективность.

## ВВЕДЕНИЕ

Засоление почв является одной из наиболее серьезных экологических и аграрных проблем, особенно в засушливых и орошаемых регионах. По данным Глобальной карты засоленных почв (GSASmap), около 1 381 млн га, или 10,7% площади суши, подвержены засолению [1]. Наиболее пострадавшими регионами являются Австралия, Аргентина и Казахстан.

В засушливых и полузасушливых зонах Южного Казахстана засоление пахотных земель формируется под воздействием природных факторов - интенсивного испарения, близкого залегания грунтовых вод, а также антропогенных причин, включая нерациональное орошение, недостаточную дренированность и несбалансированное применение удобрений [2, 3]. В более широком масштабе Центральной Азии негатив-

ное влияние усиливается дефицитом водных ресурсов, изменением климата и низкой эффективностью оросительно-дренажной инфра-структуры [4].

Одной из приоритетных задач сельского хозяйства Казахстана является увеличение производства зерна и кормов. Кукуруза - перспективная и высокоурожайная кормовая культура, широко возделываемая преимущественно в южных регионах страны [5]. Значительная часть урожая используется на силос, отличающийся высокой питательной ценностью, что определяет важную роль кукурузы в кормопроизводстве [6, 7].

Эффективность минерального питания является ключевым фактором формирования урожайности кукурузы, особенно на засоленных почвах [8]. Кукуруза (*Zea mays L.*) чувствительна к засолению, особенно на ранних этапах роста. Повышенная концентрация солей отрицательно влияет на прорастание семян, развитие растений и урожайность [9, 10]. При этом культура характеризуется высоким откликом на внесение азотных и фосфорных удобрений [11].

В этих условиях математическое моделирование и регрессионный анализ являются важными инструментами агрохимических исследований, позволяя количественно оценить влияние засоленности и минерального питания на продуктивность культур и обосновать оптимальные агротехнологические решения [12–16].

Таким образом, разработка и апробация моделей оптимизации минерального питания кукурузы на силос в условиях засоленных почв юга Казахстана является актуальной научно-практической задачей, направленной на повышение эффективности использования удобрений, устойчивости агроэкосистем и сохранение почвенного плодородия.

#### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Полевые исследования с кукурузой на силос проведены на опытных полях ТОО «Сарқырама» в Отырарском районе Туркестанской области (координаты-42°42'21.1"С.Ш. 68°20'06.0"В.Д.).

Объектом исследования являются светлые серозёмы Шаульдерского массива различной степени засоления, расположенного в зоне аридного и полупустынного климата, где засоление является одной из ключевых агроэкологических проблем. Ограниченное естественное вымывание и высокая испаряемость способствуют накоплению в почвах хлоридов, сульфатов и карбонатов, что существенно ограничивает сельскохозяйственное использование земель и требуют применения специальных мелиоративных мероприятий.

Анализ метеорологических показателей (данные метеостанции г. Арыс) за период октябрь 2024 – сентябрь 2025 гг. (рисунок 1) показал неравномерное распределение осадков и устойчивое превышение средних многолетних температур.

Сумма осадков составила 211,6 мм, что на 31,2 мм ниже нормы, при максимуме в октябре (49,1 мм). Летний период характеризовался выраженной засушливостью. Среднегодовая температура воздуха достигла 15,2°C, превысив норму на 3,1°C, с наибольшими положительными аномалиями весной и летом.

Положительные температурные аномалии сохранялись также в течение лета. Среднемесячная температура в июне, июле и августе составила соответственно 29,4°C, 31,0°C и 29,0°C, что указывает на жаркий и сухой летний период, характерный для континентального климата южных регионов Казахстана.

Таким образом, период с октября 2024 по сентябрь 2025 г. характеризовался тёплыми и маловлажными условиями с неравномерным распределением осадков, дефицитом влаги весной

и летом, что способствовало иссушению почв, усилению аккумуляции солей и снижению доступности питательных

веществ для растений на засоленных почвах.

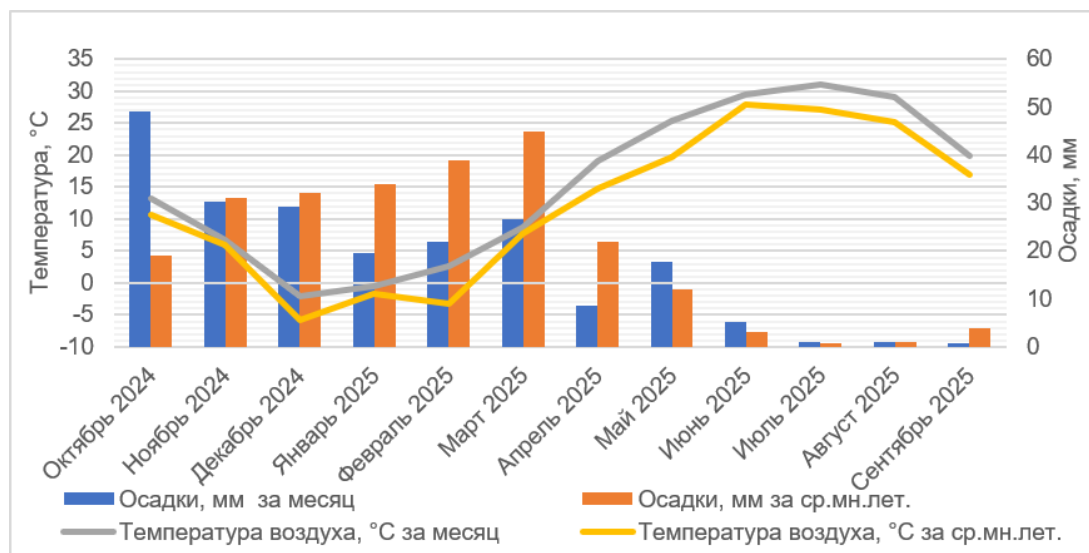


Рисунок 1 – Метеорологические показатели за период октябрь 2024 г. - октябрь 2025 г.

Посев кукурузы был проведён 14 мая 2025 г. с использованием сертифицированных семян высокопродуктивного гибрида 'Gladius F1' (FAO 700, Syngenta, Италия) двойного назначения, характеризующегося устойчивостью к полеганию, развитым фотосинтетическим аппаратом и высокой адаптивностью к почвенным условиям.

Полевые опыты закладывались на двух фонах засоления почвы (слабом и среднем) по ортогональному плану с четырьмя факторами: фон засоления (2 уровня), азот, фосфор и калий (по 4 уровня), всего 32 комбинации; площадь делянки составляла 50 м<sup>2</sup>. В качестве удобрений использовали аммиачную селитру, аммофос и сульфат калия, внесённые однократно перед посевом.

Агротехника соответствовала региональным рекомендациям, включающим зяблевую вспашку, ранневесеннее боронование, ранневесеннюю промывку, предпосевную обработку, посев, две междурядные обработки и три бороздковых полива. Почвенные пробы отби-

рали до и после промывки перед посевом и в ключевые фазы вегетации до глубины 100 см; агрохимические анализы выполняли по общепринятым методикам: содержание гумуса - по Тюрину (ГОСТ 26207-91); легкогидролизуемый азот, мг/кг, метод Тюрина-Кононовой; подвижный фосфор (P<sub>20</sub>), мг/кг - ГОСТ-26205-91; обменный калий (K<sub>20</sub>), мг/кг - ГОСТ-26205-31; pH (водный) - ГОСТ-26423-85; водная вытяжка - ГОСТ 26423-85-26428-85. В основные фазы вегетации проводили биометрические исследования и отбор растительных образцов [17-19]. Экономическая эффективность изучаемых вариантов удобрений определялась с учетом фактических технологических затрат и стоимости использованных средств.

Статистическая обработка полученных данных проведена методом дисперсионного, корреляционного и регрессионного анализов с использованием программного приложения Excel, позволяющего вести последовательную оценку и исключение незначимых коэф-

коэффициентов регрессии ( $P < 0,05$ ). Согласованность теоретических и фактических данных оценивалась с использованием коэффициента детерминации ( $R^2$ ).

Действия и взаимодействия изучаемых факторов были представлены полиномиальной моделью половинной степени в виде:

$$Y = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + a_3X_3 + a_4X_4 + a_5X_1^{0,5} + a_6X_2^{0,5} + a_7X_3^{0,5} + a_8X_4^{0,5} + a_9(X_1X_2)^{0,5} + a_{10}(X_1X_3)^{0,5} + a_{11}(X_1X_4)^{0,5} + a_{12}(X_2X_3)^{0,5} + a_{13}(X_2X_4)^{0,5} + a_{14}(X_3X_4)^{0,5}; \quad (1)$$

где:

$Y$  – результирующий (зависимый) фактор (урожайные параметры);

$a_0$  – свободный член;  $a_1, a_2, a_3, \dots, a_n$  – регрессионные коэффициенты, отражающие действие и взаимодействие факторов;

Изучаемые независимые факторы

( $X_1$  – сумма солей, %;  $X_2$  – азотные,  $X_3$  – фосфорные и  $X_4$  – калийные удобрения, кг/га).

#### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Исследования показали, что степень засоления существенно влияет на агрохимические свойства серозёмов под кукурузой. В слабозасолённых почвах содержание гумуса в слое 0–25 см составляло 1,7%, снижаясь до 0,5% на глубине 75–100 см (в среднем 0,9%), тогда как в средnezасолённых почвах оно уменьшалось до 0,1–0,5% (в среднем 0,3%).

Промывные поливы существенно изменяли водный режим и содержание подвижных форм элементов питания (таблица 1).

Таблица 1 – Динамика влажности, содержания подвижных форм питательных элементов до и после промывки серозёма светлого под кукурузой, весна, 2025 г.

Параметры	До промывки (20 марта 2025 г.)					После промывки (1 мая 2025 г.)				
	слой почвы, см					слой почвы, см				
	0-25	25-50	50-75	75-100	0-100	0-25	25-50	50-75	75-100	0-100
Фон - слабозасолённый										
Влажность почвы, %	26,3	22,5	17,7	20,8	21,8	23,8	20,6	22,4	18,6	21,4
N л.г, мг/кг	94,5	98,0	56,0	52,5	75,3	49,0	45,5	42,0	35,0	42,9
Подвижный фосфор, мг/кг	26,0	12,0	8,0	6,0	13,0	16,0	2,0	0,0	0,0	4,5
Обменный калий, мг/кг	850	420	290	240	450	460	340	220	140	290
Фон - средnezасолённый										
Влажность почвы, %	13,9	10,7	10,1	8,1	10,6	20,8	19,6	20,6	24,3	21,3
N л.г, мг/кг	56,0	42,0	36,4	53,2	46,9	42,0	33,6	30,8	25,2	32,9
Подвижный фосфор, мг/кг	18,0	4,0	4,0	4,0	7,50	18,0	4,0	0,0	0,0	5,5
Обменный калий, мг/кг	440	270	180	100	248	500	340	210	140	298

После промывки влажность слабозасолённых почв выравнивалась по профилю, а на средnezасолённом фоне

возрастала почти вдвое (с 10,7 до 21,3%), что свидетельствует о выраженном промывном эффекте и вероят-

ном вымывании солей из верхних горизонтов.

Одновременно отмечено снижение содержания питательных элементов: легкогидролизуемый азот уменьшался с 75,3 до 42,9 мг/кг на слабозасоленных и с 46,9 до 32,9 мг/кг на средне-

засоленных почвах, подвижный фосфор - до 4,5–5,5 мг/кг, обменный калий - с 450 до 290 мг/кг.

Анализ состава поглощенных оснований почв показал значительные различия между слабо- и средnezасоленными участками (таблица 2).

Таблица 2 – Содержание поглощенных оснований в серозёме светлом под кукурузой, весна, 2025 г. мг-экв./100 г почвы

Параметры	Фон - слабозасоленный					Фон - средnezасоленный				
	слой почвы, см					слой почвы, см				
	0-25	25-50	50-75	75-100	0-100	0-25	25-50	50-75	75-100	0-100
Na <sup>+</sup>	0,240	0,167	0,297	0,075	0,195	11,936	9,904	2,346	1,458	6,411
K <sup>+</sup>	0,890	0,400	0,300	0,070	0,415	0,600	0,420	0,050	0,090	0,290
Ca <sup>2+</sup>	9,410	7,430	6,440	5,940	7,305	12,870	15,84	14,85	6,930	12,62
Mg <sup>2+</sup>	5,450	4,950	4,460	7,430	5,573	5,450	7,430	7,430	6,440	6,688

На слабозасоленном фоне преобладают Ca<sup>2+</sup> и Mg<sup>2+</sup>, обеспечивая кальциево-магниевый тип поглощения с устойчивой структурой. Содержание кальция 5,94-9,41 мг-экв/100 г ( $\bar{x}$ =7,31), магния 4,46-7,43 мг-экв/100 г ( $\bar{x}$ =5,57), калия 0,07-0,89 мг-экв/100 г ( $\bar{x}$ =0,42), содержание Na<sup>+</sup> крайне низкое - 0,075-0,297 мг-экв/100 г ( $\bar{x}$ =0,195). В средnezасоленных почвах Na<sup>+</sup> резко увеличивается до 1,458–11,936 мг-экв/100 г ( $\bar{x}$ =6,41), K<sup>+</sup> снижается до 0,29 мг-экв/100 г, а Ca<sup>2+</sup> и Mg<sup>2+</sup> достигают 12,62 и 6,69 мг-экв/100 г соответственно. Натриевый тип засоления ухудшает структуру, снижает водопроницаемость и доступность питательных элементов.

Анализ водной вытяжки почв показал значительные различия между слабо- и средnezасоленными участками, а также динамику солевого состава после промывных поливов (таблица 3).

На слабозасоленном фоне суммарное содержание солей оставалось почти на исходном уровне (0,129-0,126%). На

средnezасоленном фоне до промывки сумма солей достигала в среднем 0,91%, после промывки показатели снизились до 0,59%, особенно в верхних горизонтах (0-50 см).

Таким образом, промывка улучшала водный режим, но сопровождалась потерями элементов питания, что требует дополнительного внесения удобрений перед посевом кукурузы.

Урожайные показатели кукурузы в зависимости от уровня засоленности почвы и удобрений значительно различались (таблица 4). При слабой засоленности (0,13%) наблюдалось хорошее развитие растений: густота стояния составляла 47,7–57,3 тыс. шт./га, количество початков - 10 шт./10 растений, что указывает на полноценное формирование генеративных органов. При этом масса сырых початков возрастала от 5193 до 6987 г/10 растений в зависимости от доз удобрений. На средnezасоленных почвах (0,59%) густота и продуктивная активность снижались: коли-

чество початков уменьшалось до 6,7–8,7 шт./10 растений, масса сырых початков - до 2067–2767 г/10 растений, что сопровождалось снижением общей биомассы растений и выхода силосной массы урожая.

Таблица 3 – Состав водной вытяжки серозёмов светлых под кукурузой, весна, 2025 г.

Параметры	Перед промывкой (20 марта 2025 г.)					Перед посевом (1 мая 2025 г.)				
	слой почвы, см					слой почвы, см				
	0-25	25-50	50-75	75-100	0-100	0-25	25-50	50-75	75-100	0-100
<b>Фон - слабозасоленный</b>										
Сумма солей, %	0,198	0,110	0,109	0,099	0,129	0,136	0,144	0,113	0,112	0,126
Общая в НСО <sub>3</sub> - мг/экв	0,640	0,440	0,400	0,400	0,470	0,400	0,440	0,360	0,360	0,390
СО <sub>3</sub> , мг/экв	0,000	0,080	0,000	0,000	0,020	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Cl <sup>-</sup> , мг/экв	0,110	0,150	0,110	0,110	0,120	0,110	0,070	0,110	0,070	0,090
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , мг/экв	1,990	0,960	1,060	0,940	1,238	1,430	1,570	1,180	1,200	1,345
Ca <sup>++</sup> , мг/экв	1,120	0,560	0,560	0,470	0,678	0,650	0,750	0,470	0,470	0,585
Mg <sup>++</sup> , мг/экв	0,560	0,380	0,560	0,560	0,515	0,560	0,660	0,660	0,660	0,635
Na <sup>+</sup> , мг/экв	0,670	0,470	0,380	0,380	0,475	0,560	0,610	0,480	0,460	0,528
K <sup>+</sup> , мг/экв	0,380	0,140	0,060	0,030	0,153	0,170	0,070	0,040	0,040	0,080
<b>Фон - средnezасоленный</b>										
Сумма солей, %	0,878	1,117	0,618	1,024	0,909	0,375	0,574	0,490	0,933	0,593
Общая в НСО <sub>3</sub> - мг/экв	0,36	0,32	0,24	0,32	0,310	0,320	0,400	0,360	0,320	0,350
СО <sub>3</sub> , мг/экв	0,00	0,00	0,00	0,00	0,000	0,000	0,000	0,080	0,000	0,020
Cl <sup>-</sup> , мг/экв	1,27	0,84	1,05	1,24	1,100	0,250	0,730	0,550	0,550	0,520
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , мг/экв	11,15	15,19	7,78	13,44	11,89	4,940	7,350	6,280	13,04	7,903
Ca <sup>++</sup> , мг/экв	4,3	8,6	2,24	6,92	5,515	2,430	2,340	1,400	5,610	2,945
Mg <sup>++</sup> , мг/экв	0,94	1,41	0,94	0,94	1,058	1,310	1,870	1,400	3,270	1,963
Na <sup>+</sup> , мг/экв	7,25	6,14	5,86	7,06	6,578	1,540	4,110	4,300	4,960	3,728
K <sup>+</sup> , мг/экв	0,3	0,21	0,03	0,08	0,155	0,230	0,170	0,090	0,070	0,140

Таблица 4 - Показатели продуктивности кукурузы в зависимости от уровня засоленности почвы и удобрений, 2025 г.

№ вар.	Сумма солей в 100 см слое почвы, %	Дозы минеральных удобрений, кг д.в./га			Густота стояния растений тыс. шт/га	Кол-во початков, шт/10 растений	Масса сырых початков в обертке, г/10 растений	Выход силосной массы, т/га	Отклонение от контроля, %
		N	P	K					
1	0,13	0	0	0	47,7	10,0	5193	57,9	0,0
2	0,13	0	40	30	49,7	10,0	4943	61,2	5,7
3	0,13	0	80	60	50,7	10,0	5207	66,7	15,1
4	0,13	0	120	90	47,7	10,3	5760	66,5	14,8
5	0,13	50	0	30	52,3	10,0	5642	66,4	14,7
6	0,13	50	40	0	52,7	10,3	6127	73,7	27,2
7	0,13	50	80	90	57,3	10,0	6213	81,1	40,1
8	0,13	50	120	60	55,7	10,0	6460	81,9	41,4
9	0,13	100	0	60	53,7	10,0	6227	76,8	32,6
10	0,13	100	40	90	57,0	10,0	6287	83,5	44,1
11	0,13	100	80	0	53,7	10,0	6413	77,7	34,1
12	0,13	100	120	30	57,3	10,3	6333	84,5	45,9
13	0,13	150	0	90	48,3	10,3	6590	73,9	27,5
14	0,13	150	40	60	52,0	10,0	6843	81,7	41,0
15	0,13	150	80	30	56,3	10,0	6987	90,7	56,5
16	0,13	150	120	0	54,7	10,0	6957	89,6	54,6
17	0,59	0	0	0	42,3	7,7	2067	23,0	-60,3
18	0,59	0	40	30	37,7	8,3	2253	22,2	-61,6
19	0,59	0	80	60	37,7	8,7	2680	26,1	-55,0
20	0,59	0	120	90	43,3	8,0	2767	30,6	-47,2
21	0,59	50	0	90	37,7	7,7	2260	24,9	-57,1
22	0,59	50	40	60	39,7	7,0	2427	26,5	-54,2
23	0,59	50	80	30	44,7	7,3	2580	30,1	-48,1
24	0,59	50	120	0	40,0	8,0	2737	28,7	-50,4
25	0,59	100	0	60	34,7	7,3	2407	23,0	-60,3
26	0,59	100	40	90	40,7	6,7	2493	27,0	-53,4
27	0,59	100	80	0	39,0	6,7	2517	25,9	-55,3
28	0,59	100	120	30	40,3	7,7	2567	28,1	-51,6
29	0,59	150	0	30	36,3	7,0	2133	22,9	-60,4
30	0,59	150	40	0	34,7	7,7	2323	22,4	-61,3
31	0,59	150	80	90	33,7	8,0	2373	22,6	-61,0
32	0,59	150	120	60	37,7	6,7	2417	24,5	-57,6
	НСР05				5,5	1,4	508,2	2,52	
	Точность опыта, %				4,0	5,7	4,19	1,76	

На слабозасоленных почвах внесение удобрений обеспечивало достоверный рост урожайности силосной массы кукурузы: в контроле она составляла 57,9 т/га, тогда как максимальный показатель был получен при N150P80K30 - 90,7 т/га (+56,5%). Аналогичные резуль-

таты отмечены при N150P120K0 и N100P120K30, при этом рост урожайности сопровождался увеличением густоты стояния и массы початков.

При повышении засоленности до 0,59% урожайность снижалась до 22,2 т/га (-61,6%), при этом удобрения

лишь частично компенсировали солевой стресс. Наиболее эффективными оказались варианты с фосфорно-калийным питанием и умеренными дозами азота ( $\leq 50$  кг д.в./га), тогда как высокие дозы азота (150 кг д.в./га) не повышали, а иногда снижали урожай. Различия между вариантами превышали НСР<sub>05</sub> (5,5 т/га).

Таким образом, на слабо засоленных почвах можно получать высокий урожай кукурузы при оптимальном питании, тогда как усиление засоления более чем вдвое снижает урожайность и требует дифференцированного подхода к системе удобрений.

По результатам регрессионного анализа зависимости урожайности silosной массы кукурузы ( $Y$ , т/га) от суммы солей в 0–100 см слое почвы ( $X_1$ , %), доз азотных ( $X_2$ ), фосфорных ( $X_3$ ) и калийных ( $X_4$ ) удобрений получено уравнение с высоким уровнем статистической достоверности ( $R^2 = 0,993$ ;  $F = 586,94$ ;  $p < 0,001$ ). Это указывает на то, что включенные факторы объясняют 99,3% вариации урожайности, а модель отличается высокой адекватностью и точностью прогнозирования.

Регрессионное уравнение имеет вид:

$$Y = 64,47 - 69,34X_1 - 4,328(X_1X_2)^{0,5} - 1,775(X_1X_3)^{0,5} - 0,058X_2 + 3,889X_2^{0,5} + 1,753X_3^{0,5};$$

$$R^2 = 0,993 \quad (2)$$

Анализ коэффициентов показал, что засоленность почвы ( $X_1$ ) оказывает наибольшее отрицательное влияние на урожайность ( $-69,34$ ;  $p < 0,001$ ), резко снижая продуктивность кукурузы даже при незначительном росте суммы солей [20]. Отрицательные коэффициенты взаимодействий ( $X_1X_2$ )<sup>0,5</sup> ( $-4,328$ ) и ( $X_1X_3$ )<sup>0,5</sup> ( $-1,775$ ) указывают на снижение эффективности азотных и фосфорных удобрений при засолении, тогда

как положительные коэффициенты при  $X_2^{0,5}$  (3,889;  $p < 0,001$ ) и  $X_3^{0,5}$  (1,753;  $p < 0,001$ ) отражают нелинейный отклик урожайности с эффектом убывающей отдачи от удобрений [21]. Модель статистически достоверна и подтверждает эффективность умеренных доз удобрений при слабом и среднем засолении и необходимость их снижения на высоком солевом фоне.

Экономический анализ производства кукурузы на силос показал высокую эффективность минерального питания на слабозасоленных почвах при низкой себестоимости и высокой рентабельности (рисунок 2). В контроле без удобрений валовой доход составлял 1042,8 тыс. тг/га при себестоимости 4,6 тг/кг и рентабельности 287,6%. Применение только фосфорно-калийных удобрений обеспечивало увеличение валового дохода до 1199,9 тыс. тг/га, однако сопровождалось снижением прибыли и рентабельности из-за роста затрат, что указывает на ограниченную эффективность фосфора и калия без азота.

Наибольший экономический эффект достигался при совместном внесении NPK. Варианты N50P40 и N150P80K30 обеспечили максимальную прибыль 1001,5–1194,4 тыс. тг/га при рентабельности 308,7 и 272,8% соответственно, при себестоимости 4,4–4,9 тг/кг. Повышение доз до N150P120 приводило к снижению рентабельности до 270,5% вследствие роста затрат при равных уровнях урожайности. Оптимальными для слабозасоленных почв являются дозы N100–150P80K30–60, обеспечивающие рентабельность 250–300%.

На средnezасоленных почвах эффективность удобрений резко снижалась (рисунок 3).

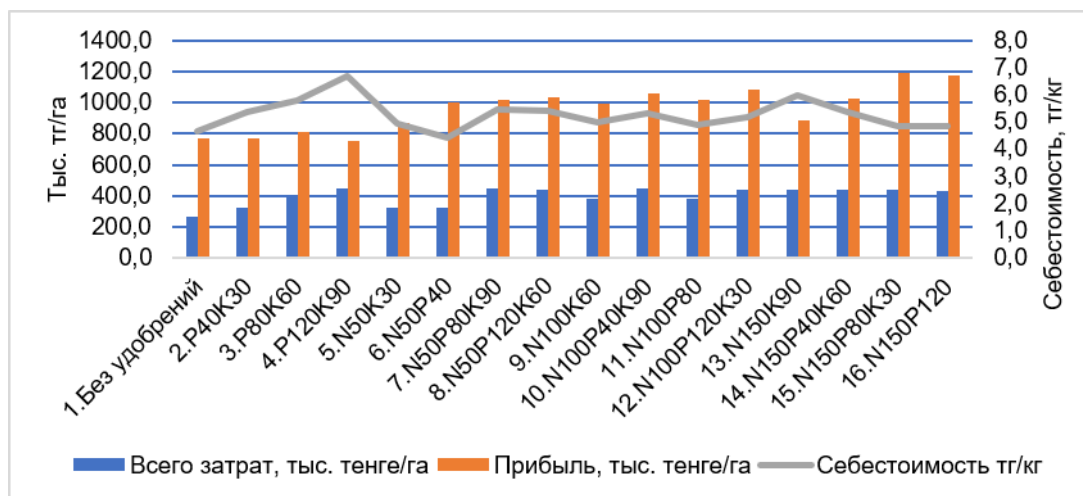


Рисунок 2 - Экономическая эффективность возделывания кукурузы на силос в условиях слабозасоленного серозёма в зависимости от доз минеральных удобрений

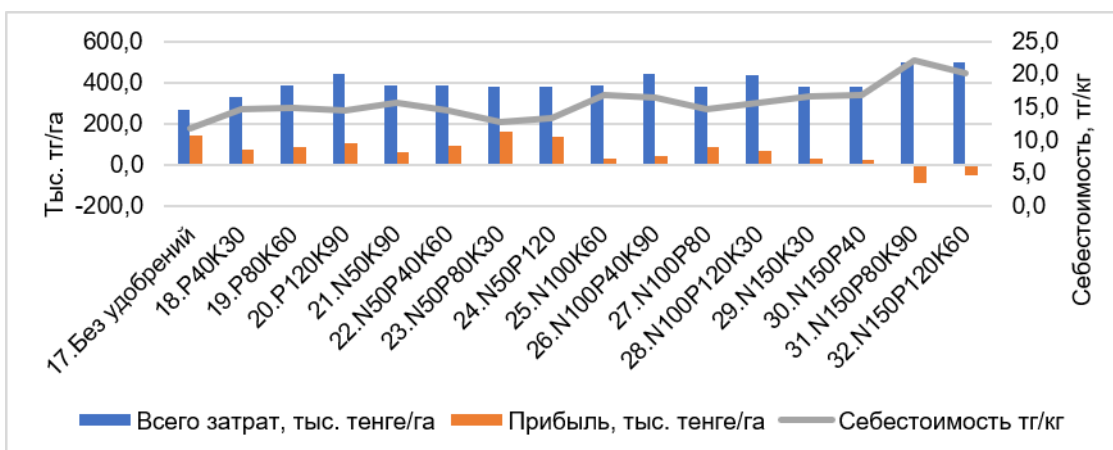


Рисунок 3 - Экономическая эффективность возделывания кукурузы на силос в зависимости от доз минеральных удобрений в условиях средnezасолённого серозёма светлого

Без удобрений валовой доход составил 413,5 тыс. тг/га, прибыль - 144,5 тыс. тг/га при рентабельности 53,7% и себестоимости 11,7 тг/кг. Фосфорно-калийные удобрения характеризовались низкой окупаемостью (рентабельность 21–24%). Лучшие показатели обеспечивали умеренные дозы N50P80K30–60 - прибыль 136,9–158,0 тыс. тг/га и рентабельность 36,0–41,2%. Повышение дозы азота до 100–150 кг/

га приводило к убыткам (до - 92,3 тыс. тг/га).

При переходе от слабого к среднему засолению валовой доход снижался более чем в 3 раза, а себестоимость возрастала до 15–22 тг/кг.

Таким образом, при слабом засолении экономически оправдано полное минеральное питание, тогда как при среднем засолении эффективны лишь умеренные дозы удобрений, прежде

всего азота в сочетании с фосфором и калием.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённые полевые исследования подтвердили существенную роль степени засоленности почвы в формировании урожайности силосной массы кукурузы и эффективности минеральных удобрений в условиях юга Казахстана. Установлено, что при слабой засоленности светлых серозёмов (0,13% суммы солей) кукуруза способна реализовывать высокий продукционный потенциал, а применение сбалансированных доз NPK обеспечивает достоверное повышение урожайности до 84,5–90,7 т/га, что на 41–57% превышает контроль без удобрений. Увеличение засоленности до 0,59% приводит к снижению продуктивности более чем в два раза, уменьшению густоты стояния растений, накопления биомассы, а также к резкому снижению эффективности минеральных удобрений.

Разработанная регрессионная модель с высокой степенью достоверности подтверждает доминирующее отрицательное влияние засоленности и снижение отдачи удобрений по мере роста солевого фона. Её использование позволяет обосновать дифференцированные и экономически эффективные системы удобрения кукурузы на силос в условиях засоленных орошаемых почв юга Казахстана. Регрессионная модель показала очень высокую достоверность ( $R^2=0,993$ ;  $p < 0,001$ ) и выявила доминирующее отрицательное влияние засоленности почвы (–69,34) при снижении эффективности азотных и фосфорных удобрений по мере роста солевого фона. На слабозасоленных почвах максимальная прибыль достигала 1194,4 тыс. тт/га при рентабельности до 309%, тогда как на средnezасоленных почвах она снижалась до 136,9–158,0 тыс. тт/га (36–41%), а высокие дозы азота вызывали убытки до –92,3 тыс. тт/га.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ

Данная статья опубликована в рамках программно-целевого финансирования научных исследований Министерства сельского хозяйства на 2024–2026 годы по программе ИРН ВР22885097 «Обеспечение рационального использования земель сельскохозяйственного назначения в интенсивном земледелии на основе новых подходов в сохранении и воспроизводстве плодородия почв».

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Global map of salt-affected soils [Электронный ресурс] // FAO Soils Portal. – Режим доступа: <https://www.fao.org/soils-portal/data-hub/soil-maps-and-databases/global-map-of-salt-affected-soils/ar/>.
2. Qadir M., Quill rou E., Nangia V., Murtaza G., Singh M., Thomas R.J., Drechsel P., Noble A.D. Economics of salt-induced land degradation and restoration // Natural Resources Forum. – 2014. – Vol. 38, № 4. – P. 282–295.
3. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Global map of salt-affected soils (GSASmap). – Rome: FAO, 2021. – 100 p.
4. FAO. Global status of salt-affected soils – main report [Электронный ресурс]. – Rome: FAO, 2024. – Режим доступа: <https://doi.org/10.4060/cd3044en>.
5. Бобренко И.А., Красницкий В.М., Кантарбаева Э.Е. Эффективность применения минеральных удобрений при возделывании гибридов кукурузы в условиях Северного Казахстана // Плодородие. – 2014. – № 5 (80).

6. Лиманская В.Б. Формирование сухой биомассы кукурузы в условиях Западного Казахстана // Вестник сельскохозяйственной науки Казахстана. – 2006. – № 12. – С. 15–16.
7. Ермохин Ю.И., Бобренко И.А. Оптимизация минерального питания сельскохозяйственных культур. – Омск: Изд-во ОмГАУ, 2005. – 286 с.
8. Амиров Б.М., Құлымбет Қ.Қ., Сапаров Г.А., Сейтменбетова А.Т., Құрманакын О.С. Урожайность кукурузы при применении различных доз и форм азотных удобрений в Шаульдерском массиве орошения Туркестанской области // Почвоведение и агрохимия. – 2023. – № 4. – С. 60–71.
9. Амиров Б.М., Базарбаев С.О., Жандыбаев О., Курманакын О.С. Моделирование урожайности кукурузы на зерно в зависимости от доз и соотношений минеральных удобрений на засоленных светлых серозёмах южного Казахстана // Почвоведение и агрохимия. – 2025. – № 1. – С. 56–72.
10. Rengasamy P. Soil processes affecting crop production in salt-affected soils // Functional Plant Biology. – 2010. – Vol. 37, № 7. – P. 613–620.
11. Yensen N.P. Halophyte uses for the twenty-first century // Trends in Plant Science. – 2006. – Vol. 11, № 11. – P. 558–565.
12. Zou H., Li D., Ren K., Liu L., Zhang W., Duan Y., Lu C. Response of maize yield and nitrogen recovery efficiency to nitrogen fertilizer application in field with various soil fertility // Frontiers in Plant Science. – 2024. – Vol. 15. – Art. 1349180.
13. Maas E.V., Hoffman G.J. Crop salt tolerance – current assessment // Journal of the Irrigation and Drainage Division. – 1977. – Vol. 103, № 2. – P. 115–134.
14. Перегудов В.Н. Планирование многофакторных полевых опытов с удобрениями и математическая обработка их результатов. – М.: Колос, 1978. – 184 с.
15. Перегудов В.Н., Иванова В.Н. К вопросу о главных эффектах и взаимодействии факторов в многофакторных опытах с удобрениями. Сообщение 1 // Агрохимия. – 1979. – № 9. – С. 110–118.
16. Цыгуткин А.С., Васбиева М.Т., Шишков Д.Г. Особенности постановки полевого опыта с минеральными удобрениями на основе неполной факториальной схемы 1/9(6×6×6) // Земледелие. – 2022. – № 6. – С. 22–26.
17. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). – 5-е изд., доп. и перераб. – М.: Агропромиздат, 1985. – 351 с.
18. Методика государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур. Вып. 2: зерновые, крупяные, зернобобовые, кукуруза и кормовые культуры. – Москва, 1989. – 197 с.
19. Ничипорович А.А., Строганова Л.Е., Чмора С.Н. Фотосинтетическая деятельность растений в посевах (методы и задачи учета в связи с формированием урожая). – М.: АН СССР, 1961. – 133 с.
20. Munns R., Gilliam M. Salinity tolerance of crops – what is the cost? // New Phytologist. – 2015. – Vol. 208, № 3. – P. 668–673.
21. Havlin J.L., Tisdale S.L., Nelson W.L., Beaton J.D. Soil fertility and fertilizers: an introduction to nutrient management. – 8th ed. – Upper Saddle River, NJ: Pearson Education Inc., 2014. – 515 p.

## REFERENCES

1. Global map of salt-affected soils [Elektronnyy resurs] // FAO Soils Portal.  
– Rezhim dostupa: <https://www.fao.org/soils-portal/data-hub/soil-maps-and-databases/global-map-of-salt-affected-soils/ar/>.
2. Qadir M., Quillérou E., Nangia V., Murtaza G., Singh M., Thomas R.J., Drechsel P., Noble A.D. Economics of salt-induced land degradation and restoration // Natural Resources Forum. – 2014. – Vol. 38, № 4. – P. 282–295.
3. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Global map of salt-affected soils (GSASmap). – Rome: FAO, 2021. – 100 p.
4. FAO. Global status of salt-affected soils – main report [Elektronnyy resurs].  
– Rome: FAO, 2024. – Rezhim dostupa: <https://doi.org/10.4060/cd3044en>.
5. Bobrenko I.A., Krasnitskiy V.M., Kantarbaeva E.E. Effektivnost primeneniya mineralnykh udobreniy pri vozdeleyvanii gibridov kukuruzy v usloviyakh Severnogo Kazakhstana // Plodorodie. – 2014. – № 5 (80).
6. Limanskaya V.B. Formirovanie sukhoy biomassy kukuruzy v usloviyakh Zapadnogo Kazakhstana // Vestnik selskokhozyaystvennoy nauki Kazakhstana. – 2006. – № 12. – S. 15–16.
7. Ermokhin Yu.I., Bobrenko I.A. Optimizatsiya mineralnogo pitaniya selskokhozyaystvennykh kultur. – Omsk: Izd-vo OmGAU, 2005. – 286 s.
8. Amirov B.M., Qulymbet Q.Q., Saparov G.A., Seitmenbetova A.T., Qurmanaqyn O.S. Urozhaynost kukuruzy pri primenenii razlichnykh doz i form azotnykh udobreniy v Shaulderskom massive orosheniya Turkestanskoy oblasti // Pochvovedenie i agrokhimiya. – 2023. – № 4. – S. 60–71.
9. Amirov B.M., Bazarbaev S.O., Zhandybaev O., Kurmanakyn O.S. Modelirovanie urozhaynosti kukuruzy na zerno v zavisimosti ot doz i sootnosheniy mineralnykh udobreniy na zasolennykh svetlykh serozemakh yuzhnogo Kazakhstana // Pochvovedenie i agrokhimiya. – 2025. – № 1. – S. 56–72.
10. Rengasamy P. Soil processes affecting crop production in salt-affected soils // Functional Plant Biology. – 2010. – Vol. 37, № 7. – P. 613–620.
11. Yensen N.P. Halophyte uses for the twenty-first century // Trends in Plant Science. – 2006. – Vol. 11, № 11. – P. 558–565.
12. Zou H., Li D., Ren K., Liu L., Zhang W., Duan Y., Lu C. Response of maize yield and nitrogen recovery efficiency to nitrogen fertilizer application in field with various soil fertility // Frontiers in Plant Science. – 2024. – Vol. 15. – Art. 1349180.
13. Maas E.V., Hoffman G.J. Crop salt tolerance – current assessment // Journal of the Irrigation and Drainage Division. – 1977. – Vol. 103, № 2. – P. 115–134.
14. Peregudov V.N. Planirovanie mnogofaktornykh polevykh opytov s udobreniyami i matematicheskaya obrabotka ikh rezultatov. – M.: Kolos, 1978. – 184 s.
15. Peregudov V.N., Ivanova V.N. K voprosu o glavnykh effektakh i vzaimodeystvii faktorov v mnogofaktornykh opytakh s udobreniyami. Soobshchenie 1 // Agrokhimiya. – 1979. – № 9. – S. 110–118.
16. Tsygutkin A.S., Vasbieva M.T., Shishkov D.G. Osobennosti postanovki polevogo opyta s mineralnymi udobreniyami na osnove nepolnoy faktorialnoy skhemy 1/9 (6×6×6) // Zemledelie. – 2022. – № 6. – S. 22–26.
17. Dospekhov B.A. Metodika polevogo opyta (s osnovami statisticheskoy obrabotki rezultatov issledovaniy). – 5-e izd., dop. i pererab. – M.: Agropromizdat, 1985. – 351 s.

18. Metodika gosudarstvennogo sortoispytaniya selskokhozyaystvennykh kultur. Вып. 2: zernovye, krupyanye, zernobobovye, kukuruza i kormovye kultury. – Moskva, 1989. – 197 s.

19. Nichiporovich A.A., Stroganova L.E., Chmora S.N. Fotosinteticheskaya deyatel'nost rasteniy v posevakh (metody i zadachi ucheta v svyazi s formirovaniem urozhayev). – M.: AN SSSR, 1961. – 133 s.

20. Munns R., Gilliam M. Salinity tolerance of crops – what is the cost? // New Phytologist. – 2015. – Vol. 208, № 3. – P. 668–673.

21. Havlin J.L., Tisdale S.L., Nelson W.L., Beaton J.D. Soil fertility and fertilizers: an introduction to nutrient management. – 8th ed. – Upper Saddle River, NJ: Pearson Education Inc., 2014. – 515 p.

#### ТҮЙІН

Б.М. Амиров<sup>1\*</sup>, С.О. Базарбаев<sup>1</sup>, О.С. Жандыбаев<sup>1</sup>

#### ҚАЗАҚСТАННЫҢ ОҢТҮСТІГІНДЕГІ ТҰЗДАЛҒАН ТОПЫРАҚТАРДА ЖҮГЕРІНІҢ СҮРЛЕМДІК БИОМАССАСЫНЫҢ ҚАЛЫПТАСУЫНА МИНЕРАЛДЫҚ ТЫҢАЙТҚЫШТАРДЫҢ ӘСЕРІН МОДЕЛЬДЕУ

<sup>1</sup>Ө.О. Оспанов атындағы Қазақ топырақтану және агрохимия

ғылыми-зерттеу институты, 050060, Алматы, Байрақ көшесі, 10, Қазақстан,

\*e-mail: bak.amirov@gmail.com

Мақалада Қазақстанның оңтүстігіндегі топырақ тұздылығының әртүрлі дәрежесі жағдайында минералдық тыңайтқыштардың дозалары мен қатынастарының жүгерінің сүрлемдік массасы өнімділігіне әсерін бағалау бойынша егістік зерттеулер нәтижелері келтірілген. Зерттеулер Түркістан облысы Отарар ауданындағы әр деңгейде тұзданған ашық сұр топырақтарында жүргізілді. Зерттеу объектісі ретінде Gladius F1 буданы (FAO 700) алынды. Тыңайтқыштар дозасы N0–150, P0–120, K0–90 аралығында зерттелді. Биометриялық көрсеткіштер, сүрлемдік массаның өнімділігі және тыңайтқыштарды қолданудың экономикалық тиімділігі бағаланды. Әлсіз тұзданған топырақтарда минералдық тыңайтқыштарды қолдану жүгерінің силостық массасы өнімділігі бақылаумен салыстырғанда гектарына шаққанда 84,5–90,7 тоннаға, яғни 41,4–56,5% дейін артатындығы анықталды. Тұздылық күшейген сайын өнімділік екі еседен астам төмендеді, ал азоттың жоғары дозаларының тиімділігі тұздық стресс күшейуіне байланысты азайды. Көп өлшемді регрессиялық талдау арқылы жоғары сенімділік дәрежесі бар ( $R^2=0,993$ ;  $F=586,94$ ;  $p<0,001$ ) модель алынды; ол тұздылықтың неғұрлым теріс әсерін және дақылдың өнімінің тыңайтқыштарға тікелей әсерін растайды. Әлсіз тұзданған топырақтарда минералдық тыңайтқыштарды орташа мөлшерде қолдану (N100–150, P80, K30–60 кг/га) экономикалық тұрғыдан тиімді: пайда 1194 мың теңге/га дейін, рентабельділік 270–300% құрайды. Орташа тұзданған топырақтарда өнімділікті төмендеткенмен рентабельділікті мүмкіндігінше түсірмейтін тыңайтқыштардың ең тиімді мөлшері - N50P80K30–60. Әр түрлі тұздану дәрежесінде фосфор-калий тыңайтқыштарын қолдану дақылдың төзімділігін арттырады, ал азоттың мөлшерін фосфорсыз шамадан тыс қолдану экономикалық тиімділікті төмендетеді. Нәтижелер топырақ тұздылығын ескере отырып, жүгеріні силосқа өсіру үшін тыңайту жүйесіне дифференциалды және бейімделмелі тәсілдің қажеттігін растайды.

*Түйінді сөздер:* жүгері, сүрлемдік масса, тұзданған топырақтар, минералдық тыңайтқыштар, өнімділік, модельдеу, экономикалық тиімділік.

## SUMMARY

B.M. Amirov<sup>1\*</sup>, S.O. Bazarbaev<sup>1</sup>, O.S. Zhandybaev<sup>1</sup>

## MODELING THE EFFECT OF MINERAL FERTILIZERS ON MAIZE SILAGE BIOMASS FORMATION UNDER SALINE SOIL CONDITIONS IN SOUTHERN KAZAKHSTAN

<sup>1</sup>*U.U. Uspanov Kazakh Research Institute of Soil Science and Agrochemistry, 050060, Almaty, Bayraq St.. 10, Kazakhstan, \*e-mail: bak.amirov@gmail.com*

The article presents the results of field studies aimed at evaluating the effects of mineral fertilizer rates and nutrient ratios on maize silage yield under different levels of soil salinity in southern Kazakhstan. The research was conducted on light sierozem soils in the Otyrar district of the Turkistan Region under two soil salinity backgrounds (0,13% and 0,59% total soluble salts). The object of the study was the maize hybrid Gladius F1 (FAO 700). Fertilizer rates ranged from N0–150, P0–120, and K0–90 kg ha<sup>-1</sup>. Biometric parameters, silage biomass yield, and the economic efficiency of fertilizer application were evaluated. The results showed that on slightly saline soils, mineral fertilizer application significantly increased maize silage yield to 84,5–90,7 t ha<sup>-1</sup>, which was 41,4–56,5% higher than the unfertilized control. Under moderate salinity conditions, productivity decreased by more than twofold, while the efficiency of high nitrogen rates declined due to increased salt stress. Using multiple regression analysis, a highly reliable model was developed ( $R^2 = 0,993$ ;  $F = 586,94$ ;  $p < 0,001$ ), confirming the dominant negative effect of soil salinity and the nonlinear response of maize to fertilizer application. On slightly saline soils, the economically optimal fertilizer rates were N100–150, P80, and K30–60 kg ha<sup>-1</sup> of active ingredient, providing the highest profit (up to 1,194 thousand KZT ha<sup>-1</sup>) and profitability of 270–300%. On moderately saline soils, the optimal fertilization strategy was a moderate nutrient supply of N50P80K30–60, which maintained positive profitability while minimizing the risk of yield losses. For both salinity levels, phosphorus and potassium nutrition played a protective role by enhancing maize tolerance to salinity, whereas excessive nitrogen application without adequate phosphorus reduced economic efficiency. The findings confirm the necessity of a differentiated and adaptive fertilization strategy for silage maize cultivation based on the degree of soil salinity.

*Keywords:* maize, silage biomass, saline soils, mineral fertilizers, yield, modeling, economic efficiency.

## 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. Базарбаев Султан Оразбаевич - Младший научный сотрудник отдела агрохимии, PhD, <https://orcid.org/0009-0006-3590-0625>, e-mail: sultan-13\_01@mail.ru

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