

ISSN 1999-740X (Print)
ISSN 2959-3433 (Online)
№ 4 (76) ДЕКАБРЬ 2026

ПОЧВОВЕДЕНИЕ И АГРОХИМИЯ

ПОЛИГРАФИЯ СЕРВИСИК

Алматы

Министерство сельского хозяйства Республики Казахстан
НАО «Национальный аграрный научно-образовательный центр»
ТОО «Казахский НИИ почвоведения и агрохимии им. У.У. Успанова»
НАО «Национальная академия наук Республики Казахстан
при президенте Республики Казахстан»

ПОЧВОВЕДЕНИЕ И АГРОХИМИЯ

№ 4 (76) ДЕКАБРЬ 2026

Министерство сельского хозяйства Республики Казахстан
НАО «Национальный аграрный научно-образовательный центр»
ТОО «Казахский НИИ почвоведения и агрохимии им. У.У. Успанова»
НАО «Национальная академия наук Республики Казахстан
при президенте Республики Казахстан»

ПОЧВОВЕДЕНИЕ И АГРОХИМИЯ

№ 4 (76) декабрь 2026

Основан в 2007 г. Выходит 4 раза в год

ISSN 1999-740X (Print); ISSN 2959-3433 (Online)

Главный редактор
Б.У. Сулейменов

Редакционная коллегия:
Р.Х. Рамазанова (заместитель главного редактора),
М.А. Ибраева (ответственный секретарь),
Георг Гуггенбергер (Германия), А.В. Козлов (Россия),
М.Г. Мустафаев (Азербайджан), М.В. Филипова (Болгария),
Б.М. Амиров, Б.Н. Насиев, Г.А. Сапаров,
М.Т. Егізтай (компьютерная верстка)

Журнал входит в Перечень изданий, рекомендуемых Комитетом по обеспечению качества в сфере науки и высшего образования Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан для публикации основных результатов научной деятельности. Приказ №603 от 12 июля 2024 г.

Зарегистрирован в Министерстве культуры и информации Республики Казахстан. Свидетельство о регистрации № 8457 ЭК от 18.06.2007 г. и перерегистрации № 9898-Ж от 11.02.2009 г.

Входит в Казахстанскую базу цитирования (КазБЦ) и Российскую базу данных научного цитирования (РИНЦ). Размещен в научной электронной библиотеке https://elibrary.ru, электронной библиотеке https://cyberleninka.ru

Сайт журнала: https://journal.soil.kz/jour

С целью объединения усилий, продвижения и популяризации результатов научных изысканий казахстанских ученых в мировом сообществе ТОО «Казахский научно-исследовательский институт почвоведения и агрохимии имени У.У.Успанова» совместно с НАО «Национальная академия наук Республики Казахстан при Президенте Республики Казахстан» издает научный журнал «Почвоведение и агрохимия».

Адрес редакции: 050060, Алматы, пр. аль-Фараби, 75 В
©Казахский НИИ почвоведения и агрохимии имени У.У. Успанова, 2008

СОДЕРЖАНИЕ

Плодородие почв

M.K. Tynykulov, R.K. Pernebekova, R.U. Mamykova, G.S. Zhakipbekova, N.V. Malitskaya, A.K. Mukhtarov Agroclimatic modelling of soil biological activity in Kazakhstan and zoning of the territory by the potential for application of microbial preparations 5

Биология почв

R. Aipova, A.A. Kurmanbaev, Sh.G. Yermek, A.K. Amanbossyn, S.I. Tanirbergenov Assessment of biological activity and soil health parameters of various soil types in the Zhetysu region 21

Экология почв

Д.А. Досманбетов, А.Б. Ибраева, Е. М. Каспакбаев, Р.С. Ахметов, Ж.С. Дукенов, Н.С. Келгенбаев, Ж.К. Ракымбеков, С.У. Косанов, М.А. Уашев Арал теңізінің құрғаған табанындағы тәжірибелік учаскелердегі топырақ ылғалдылығының динамикасы 32

А.Х. Наушабаев, С.С. Наушабаева, Н. Сейткали, Т.К. Василина, К.О. Караева, Н.П. Аубакиров Трансформация ионного комплекса деградированных солонцов пашни семиаридной зоны Акмолинской области под воздействием серных мелиорантов: лабораторное исследование 46

Агрохимия

Б.М. Амиров, А.Т. Сейтменбетова, Г.А. Сапаров, С.О. Базарбаев, О.С. Жандыбаев Оптимизация питания хлопчатника на засоленных почвах Туркестанской области методами машинного обучения 60

K.H. Diri, R.H. Ramazanova, S.M. Kulzhanova, A.H. Mohamud, M. Mussakhan, O. Tate Joseph, J.B. Teknikio Soil microbial responses following sulfonylurea herbicide application in semi-arid agroecosystems 74

А.Ж. Сманов, Т.А. Атақұлов, Н.А. Барлыкова, А.М. Тағаев, С. Махмаджанов, О. Дүйсен Органикалық тыңайтқыштардың мақта егістігіндегі топырақ құнарлылығына ықпалы 89

Обзорная статья

A.I. Suleimenova, M.N. Poshanov, A.S. Vyrakhmanova From mechanisms to field application: a systematic review of silicon-mediated salinity tolerance in plants 104

CONTENT

Soil fertility

M.K. Tynykulov, R.K. Pernebekova, R.U. Mamykova, G.S. Zhakipbekova, N.V. Malitskaya, A.K. Mukhtarov Agroclimatic modelling of soil biological activity in Kazakhstan and zoning of the territory by the potential for application of microbial preparations 5

Soil biology

R. Aipova, A.A. Kurmanbaev, Sh.G. Yermek, A.K. Amanbossyn, S.I. Tanirbergenov Assessment of biological activity and soil health parameters of various soil types in the Zhetysu region 21

Soil ecology

D.A. Dosmanbetov, A.B. Ibraeva, Y.M. Kaspakbayev, R.S. Akhmetov, Zh.S. Dukenov, N.S. Kelgenbaev, Zh.K. Rakymbekov, S.U. Kosanov, M.A. Uashev Soil moisture dynamics in experimental sites of the dried Aral sea beds 32

A.H. Naushabayev, S.S. Naushabayeva, N. Seitkali, T.K. Vassilina, K.O. Karayeva, N.P. Aubakirov Transformation of the ionic complex of degraded solonetz soils of the arable land of the semiaride zone of the Akmola region under the influence of sulfur ameliorants: a laboratory study 46

Agrochemistry

B.M. Amirov, G.A. Saparov, A.T. Seitmenbetova, S.O. Bazarbayev, O.S. Zhandybayev Optimization of cotton nutrition on saline soils of the Turkestan region using machine learning methods 60

K.H. Diri, R.H. Ramazanova, S.M. Kulzhanova, A.H. Mohamud, M. Mussakhan, O. Tate Joseph, J.B. Teknikio Soil microbial responses following sulfonylurea herbicide application in semi-arid agroecosystems 74

A.Zh. Smanov, T.A. Atakulov, N.A. Barlykova, A.M. Tagaev, S. Makhmadzhanov, O. Duysen Effect of organic fertilizers on the fertility of cotton soils 89

Review

A.I. Suleimenova, M.N. Poshanov, A.S. Vyrakhmanova From mechanisms to field application: a systematic review of silicon-mediated salinity tolerance in plants 104

ПЛОДОРОДИЕ ПОЧВ

IRSTI 68.05.29; 34.27.21
DOI: 10.51886/1999-740X_2026_4_5

M.K. Tynykulov[1], R.K. Pernebekova[2,3], R.U. Mamykova[4], G.S. Zhakipbekova[3], N.V. Malitskaya[5], A.K. Mukhtarov[1]

AGROCLIMATIC MODELLING OF SOIL BIOLOGICAL ACTIVITY IN KAZAKHSTAN AND ZONING OF THE TERRITORY BY THE POTENTIAL FOR APPLICATION OF MICROBIAL PREPARATIONS

[1]L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan
[2]Khoja Akhmet Yassawi International Kazakh-Turkish University, Faculty of Postgraduate Higher Medical Education, Turkestan, Kazakhstan
[3]South Kazakhstan Medical Academy, Faculty of Medicine Shymkent, Kazakhstan
[4]Zhanibekov University, Faculty of Natural Sciences, Shymkent, Kazakhstan
[5]M. Kozybayev North Kazakhstan State University, e-mail: mr.tynykulov@mail.ru

Abstract. The field performance of microbial preparations in Kazakhstan remains unstable, and one of the main reasons is abiotic: introduced microorganisms establish and function only within a narrow range of soil temperature and moisture, which in a sharply continental climate stays open for a short time. The aim of the study was to describe quantitatively the seasonal dynamics of soil biological activity in Kazakhstan and, on that basis, to delineate zones differing in their potential for the use of microbial preparations. A process-based model was developed in which soil temperature at a depth of 10 cm, the daily water balance of the 0–50 cm layer and a daily index of biological activity - the product of the Lloyd–Taylor temperature function and a moisture function expressed through water-filled pore space - were computed from the 1991–2020 climate normals of 16 weather stations. The temperature module was verified against published soil temperature normals for the Astana station (R^2=0.997; standard error 1.0°C) and the carbon module against field measurements of CO_2 efflux at Shortandy and a 261-record subset of the global SRDB-V5 database. The annual index varied 2.5-fold across the country and the computed carbon mineralisation ranged from 254 to 811 g C m^{-2} yr^{-1}. Three biotechnological windows were introduced - inoculation, nitrogen fixation and crop-residue decomposition - lasting 32–75, 0–84 and 0–117 days, respectively. Ward clustering identified four biotechnological zones (silhouette 0.51). Under RCP4.5 and RCP8.5 the index increased by 17.5 and 23.4% by 2040–2059, the inoculation window narrowed and the decomposition window lengthened, which shifts the priority of soil biotechnology from stimulating mineralisation towards conserving soil organic matter.

Keywords: soil biological activity, soil microorganisms, microbial preparations, carbon mineralisation, soil water regime, agroclimatic zoning, climate change.

INTRODUCTION

Soil biological activity is an integral expression of the work of the soil microbiome: it is microorganisms that close the carbon and nitrogen cycles, mobilise poorly available forms of phosphorus, build water-stable structure and govern the rate at which plant residues are converted into humic substances. Any assessment of soil fertility that ignores the biological component therefore remains incomplete, and any technology for restoring fertility relies, in one way or another, on managing microbial activity. For Kazakhstan the problem is particularly acute. On the arable land of the republic, which exceeds 24 million ha, half a century of intensive cropping has caused marked dehumification. According to generalised data, humus content in southern chernozems has decreased by 25–35%, and on the light soils of the former virgin lands locally by more than 40% [1]. Direct comparisons of virgin and arable land confirm the scale of the losses: in the carbonate southern chernozem of Akmola region the humus content of the 0–20 cm

layer is 4.64% under virgin vegetation and only 2.60–3.07% on arable land; in the haplic chernozem of Kostanay region the corresponding values are 5.74 and 3.80–4.42% [2]. Loss of organic matter simultaneously means loss of substrate for the microbiota, that is, a self-sustaining decline in biological activity.

Microbial biotechnology is today regarded as one of the most accessible ways of partially restoring the biological potential of soils. Kazakhstan has established its own culture collection base and obtained convincing laboratory results. From the wheat rhizosphere of Akmola region, strains of *Pseudomonas fluorescens*, *Bacillus cereus*, *Enterobacter cloacae* and *E. ludwigii* were isolated and identified by MALDI-TOF; they increased wheat seedling length from 10.1 cm in the control to 14.7–15.3 cm [3]. Screening of 848 cultures of micromycetes and yeasts from agrocenoses of the republic showed that 24.9% of the isolates mobilised phosphates and 16.4 % possessed cellulolytic activity, while 35 selected strains increased the length and mass of barley seedlings 1.2–1.5-fold [4]. On irrigated saline soils of Turkistan region the halophilic strain *Bacillus* sp. PK-1 gave a maize yield increase of 15–35% [5]. Isolates of the genera *Pseudomonas* and *Agrobacterium* from agrocenoses of Almaty region increased alfalfa seedling length from 12.6 to 70.1 mm [6].

The reproducibility of these effects under production conditions nevertheless remains low, and the reason is by no means always biological. A population introduced into the soil must not only withstand competition with the indigenous community but also arrive within the period when soil temperature and moisture simultaneously permit its growth. In the sharply continental climate of Kazakhstan this period is short, shifts in the calendar from zone to zone and varies strongly between years. Yet agronomic regulations for the use of microbial preparations usually contain no zonal reference and are transferred from regions with an entirely different hydrothermal regime. A quantitative basis for such a reference is still lacking. Conventional agroclimatic indicators - the sum of active temperatures and the Selyaninov hydrothermal coefficient - characterise conditions for plants rather than for microorganisms: they take into account neither the temperature of the soil itself nor the fact that microbial activity is suppressed both by desiccation and by waterlogging. Direct measurements of soil respiration within the republic are isolated [7].

The aim of the present work was to build a process-based model of the seasonal dynamics of soil biological activity in Kazakhstan, relying on published response functions of the microbial community to temperature and moisture, to verify it against independent data and to use it for zoning the territory by the potential for application of microbial preparations, as well as for assessing how this potential will change by the middle of the century. The scientific novelty lies in the transition from a descriptive characterisation of soil-climatic zones to the calculation of specific biotechnological windows - periods during which the use of a particular group of preparations is physically justified.

MATERIALS AND METHODS

Input data. Calculations were performed for 16 weather stations covering all the main soil-climatic zones of Kazakhstan, from the haplic chernozems of North Kazakhstan region to the grey-brown desert soils of the Aral Sea area and the piedmont sierozems of Zhetysu. The 1991–2020 climate normals (mean monthly maximum and minimum air temperatures, monthly precipitation totals) of World Meteorological Organization stations were used. Soil-zonal parameters - humus content of the plough layer, field capacity, wilting point and bulk density - were adopted from [2] and from reference values for the corresponding textural classes [8]. The list of stations and the parameterisation adopted are given in table 1.

Conversion from air to soil temperature. Soil surface temperature exceeds air temperature during the period of radiative warming and is slightly lower in the presence of snow cover. This excess was described as a linear function of air temperature above a threshold of 5°C, the coefficient of which was calibrated against the published soil temperature normals of the Astana station [9]:

$$T_s = T_a + 0.31 \cdot \max(0; T_a - 5) - 1.0 \cdot I(T_a < 0) \quad (1)$$

where T_s is soil surface temperature, °C; T_a is mean daily air temperature, °C; and I is an indicator function. The transition to a depth of 10 cm was made using the analytical solution of the heat conduction equation for the annual harmonic: at a thermal diffusivity of $0.5 \cdot 10^{-6}$ m^2 s^{-1} the damping depth is 2.24 m and the amplitude of the annual wave at 10 cm is attenuated by a factor of 0.956. The approach corresponds to that adopted in continental soil temperature models [10]. Daily series were obtained by interpolating monthly normals with a cyclic spline.

Water regime. Potential evapotranspiration was calculated by the Thornthwaite method [11] with a correction for day length at the latitude of the station. The daily water balance of the 0–50 cm layer was reproduced using the Thornthwaite–Mather scheme: when precipitation exceeded evapotranspiration, soil water storage was replenished up to field capacity, and under a deficit it decreased exponentially with a constant equal to the available water range. Four iterations of the annual cycle were performed to remove the effect of initial conditions. Volumetric water content was converted into water-filled pore space (WFPS) through porosity determined from bulk density and a particle density of 2.65 g cm^{-3}. *Response functions.* The thermal response of microbial respiration was described by the Lloyd–Taylor function [12] normalised to 10°C:

$$f_T = \exp[E_0 \cdot (1/(T_{ref} - T_0) - 1/(T - T_0))] \quad (2)$$

where T is soil temperature, K; T_0 = 227.13 K; Tref = 283.15 K; E_0 = 308.56 K. Below −2°C activity was set to zero. The moisture function was specified as piecewise linear: a linear increase from a lower WFPS limit of 0.05 to an optimum of 0.60 and a decrease to 0.55 at full saturation. The position of the optimum was adopted from a generalisation of experimental data [13, 14], according to which the maximum heterotrophic respiration of mineral soils occurs at 0.60–0.63 of saturation. The daily index of biological activity was defined as the product fT·fW, and the annual index (BAI) as its yearly sum. BAI is expressed in standard days: unity corresponds to one day with a soil temperature of 10°C and optimum moisture.

Calibration and verification. Absolute values of carbon mineralisation were obtained by multiplying BAI by a substrate factor $\sqrt{(H \cdot \rho)}$, where H is humus content, %, and ρ is bulk density, g cm^{-3}. The square root reflects the fact that the rate of decomposition is not proportional to the entire stock of organic matter, a considerable part of which is stabilised. The scaling coefficient (1.213) was determined from four field measurements of annual CO_2 efflux on a southern chernozem at Shortandy (51.6° N, 71.1° E): 366, 428, 487 and 551 g C m^{-2} yr^{-1}, with a mean of 458 g C m^{-2} yr^{-1} [7]. For independent verification an empirical climatic regression was built using the global soil respiration database SRDB-V5 [15, 16]; a "dry continental" subset was selected from it 261 records for grassland, agricultural, shrubland and desert ecosystems with annual precipitation of 150–500 mm and a mean annual temperature from −2 to 14°C:

$$\ln R_s = -2.998 + 1.529 \cdot \ln P + 0.0211 \cdot T, \quad R^2 = 0.25 \quad (3)$$

Biotechnological windows. Three periods relevant to the practical use of microbial preparations were introduced. The inoculation window is the spring period (before 1 July) with a soil temperature of 8–25°C and WFPS of at least 0.30, when mesophilic bacteria introduced at sowing are able to establish. The nit-

rogen-fixation window is the period with a soil temperature of 15–30°C and WFPS of at least 0.35, corresponding to the operating conditions of symbiotic and associative diazotrophs. The decomposition window is the period from 1 August to 30 November with a soil temperature of at least 5°C and WFPS of at least 0.25, during which cellulolytic preparations applied to stubble can decompose straw.

Zoning and scenarios. The stations were grouped by Ward hierarchical clustering [18] using five standardised variables (BAI, mean moisture function and the durations of the three windows); the number of clusters was chosen by the maximum mean silhouette [19]. Spatial interpolation was performed as a combination of a linear trend in coordinates and inverse-distance-weighted interpolation of the residuals, masked by the state border. Climate projections for 2040–2059 were constructed by the delta-change method using the CMIP5 ensemble for the RCP4.5 (+2.2°C, precipitation +3%) and RCP8.5 (+2.8°C, precipitation +4%) scenarios [17], with subtraction of the observed warming of 0.28°C between the midpoints of the baseline periods. The calculations were carried out in Python 3 using the NumPy and Matplotlib libraries; all algorithms were implemented by the authors.

Table 1 – Weather stations, soil-zonal parameterisation and climatic characteristics (1991–2020 normals)

Station	Latitude / longitude, °	Elevation, m	Soil zone	Humus, %	AWR, mm	T, °C	Precipitation, mm	PET, mm
Petropavl	54.83 / 69.15	142	Haplic Chernozem	4.10	80	2.7	387	587
Kostanay	53.22 / 63.62	171	Haplic Chernozem	4.10	80	4.0	352	616
Astana	51.13 / 71.37	350	Southern Chernozem	2.85	75	4.1	338	608
Oral	51.25 / 51.40	35	Southern Chernozem	2.85	75	6.7	337	667
Aktobe	50.28 / 57.15	219	Dark Kastanozem	2.40	70	5.9	316	652
Pavlodar	52.30 / 76.95	122	Dark Kastanozem	2.40	70	3.6	311	610
Oskemen	49.95 / 82.62	285	Dark Kastanozem	2.40	70	4.3	477	604
Karaganda	49.80 / 73.15	553	Kastanozem	2.00	65	4.2	381	590
Semey	50.40 / 80.25	206	Kastanozem	2.00	65	4.4	303	615
Zhezkazgan	47.80 / 67.72	346	Light Kastanozem	1.60	60	6.2	183	669
Atyrau	47.12 / 51.92	-22	Brown desert soil	0.80	55	10.7	187	789
Kyzylorda	44.85 / 65.50	130	Grey-brown desert soil	1.35	55	11.5	146	828
Turkistan	43.30 / 68.25	207	Light Sierozem	1.10	75	13.5	206	871
Taraz	42.85 / 71.38	653	Typical Sierozem	1.70	80	11.5	357	736
Shymkent	42.32 / 69.70	604	Typical Sierozem	1.70	80	13.4	617	811
Almaty	43.23 / 76.93	847	Dark piedmont Sierozem	2.30	80	10.9	674	720

Note: AWR is the available water range of the 0–50 cm layer; T is mean annual air temperature; PET is annual potential evapotranspiration after Thornthwaite.

RESULTS AND DISCUSSION

Model verification. The annual course of soil surface temperature calculated from Equation (1) reproduced the published normals of the Astana station with a coefficient of determination of 0.997, a standard error of 1.0°C and a systematic bias of +0.2°C (Figure 1c). The largest discrepancies occurred in March and October (+1.7 and +1.4°C) and were related to the effect of snow cover and delayed thawing, which the model does not describe explicitly. For

quantities integrated over the year this accuracy is sufficient, as confirmed by a sensitivity analysis: a shift of the calculated soil temperature by ±2°C changed the annual index by −14.4 and +16.4%, respectively, so that an error of 1°C corresponds to about 8 % uncertainty in BAI.

An independent check of the carbon module was provided by comparing two fundamentally different estimates of mineralisation - the process-based one (the model) and the empirical-climatic one (Equation 3 based on SRDB-V5). The correlation coefficient between them across the 16 stations was 0.80, with a mean difference of only 5 g C m^{-2} yr^{-1}, although the mean absolute difference reached 177 g C m^{-2} yr^{-1}. There is thus no systematic bias, and the discrepancies are substantive; they are examined below.

Spatial structure of biological activity. The annual index of biological activity varied 2.5-fold across the republic, from 167 standard days in Karaganda region to 421 in Shymkent (figure 2a, table 2). The distribution is distinctly latitudinal, yet it cannot be reduced either to heat supply or to moisture supply alone. The maximum occurs neither at the warmest nor at the wettest point but on the piedmont sierozems of the south, where abundant winter and spring precipitation coincides with early and prolonged soil warming. The minimum is formed in the dry-steppe zone of Central Kazakhstan, where moderate heat supply is combined with deep summer desiccation. It is notable that the BAI series and the humus content series are almost in antiphase. The haplic chernozems of Northern Kazakhstan, the richest in organic matter (humus 4.1%), occupy only seventh to eleventh places by index, whereas sierozems with a humus content of 1.1–1.7% lead.

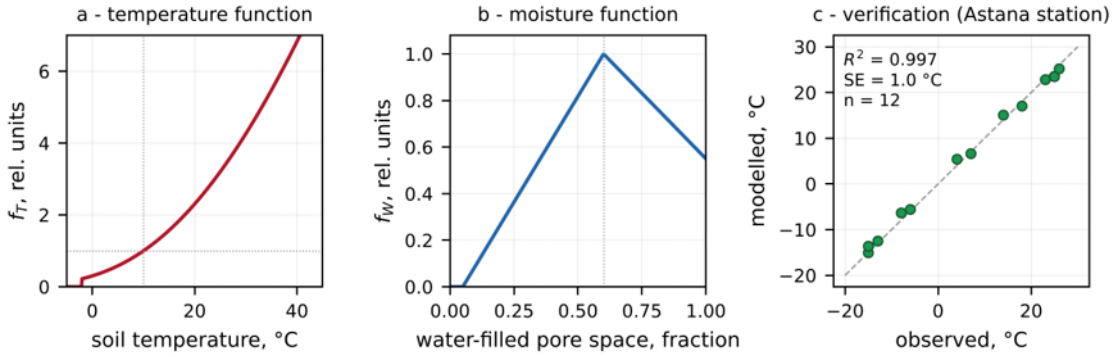


Figure 1 – Response functions of the model and verification of the temperature module: a - Lloyd–Taylor temperature function; b - moisture function; c - comparison of calculated and observed mean monthly soil surface temperatures (Astana station)

This is not a contradiction but a direct consequence of the fact that the large humus stocks of the northern chernozems were historically formed precisely because of the brevity of the period of biological activity: organic matter accumulates where mineralisation is retarded by cold. The relationship becomes obvious when absolute values are considered: taking the substrate factor into account, the calculated carbon mineralisation at Kostanay (604 g C m^{-2} yr^{-1}) is higher than at Turkistan (516 g C m^{-2} yr^{-1}) despite a substantially lower index.

Table 2 – Calculated indicators of soil biological activity by station

Station	Zone	BAI, standard days	R_s (model), g C m^{-2} yr^{-1}	R_s (SRDB), g C m^{-2} yr^{-1}	Biologically active period, days	Soil T in July–August, °C	WFPS in July–August, fraction
Petropavl	III	203.1	535	475	181	21.4	0.32
Kostanay	III	229.5	604	423	188	23.3	0.31
Astana	III	204.2	458	399	189	23.2	0.29
Oral	III	244.4	548	419	202	26.2	0.28
Aktobe	III	226.2	475	373	198	26.0	0.27
Pavlodar	III	187.6	394	347	187	23.4	0.27
Oskemen	III	207.3	436	677	192	23.2	0.28
Karaganda	IV	167.5	328	480	190	22.5	0.25
Semey	IV	170.9	334	340	192	23.8	0.24
Zhezkazgan	IV	186.4	330	163	201	27.1	0.22
Atyrau	IV	194.3	254	185	227	31.6	0.18
Kyzylorda	IV	233.4	392	129	236	32.4	0.19
Turkistan	II	355.7	516	228	259	33.3	0.24
Taraz	I	336.8	603	507	248	29.2	0.26
Shymkent	I	420.9	753	1217	269	31.5	0.26
Almaty	I	399.1	811	1321	241	28.6	0.32

Note: BAI is the annual index of biological activity; R_s is annual carbon mineralisation according to the process-based model and to the empirical regression (3); the biologically active period is the number of days with a soil temperature above 5°C and WFPS above 0.15; WFPS is water-filled pore space.

Seasonal dynamics and the leading limiting factor. The seasonal course of the indicators for four contrasting stations is shown in figure 3. In all zones except the piedmont one the curve of the daily index is markedly asymmetric: a rapid rise in spring as the soil, still wet after snowmelt, warms up, and a protracted decline in summer caused by exhaustion of soil water. At Petropavl and Karaganda the maximum falls in June, at Shymkent in May, while at Kyzylorda the curve is almost flat: at a July soil temperature of 33–34°C the water-filled pore space falls to 0.19, and the thermally favourable period proves to be biologically almost waterless. Of fundamental importance is the fact that at none of the 16 stations does water-filled pore space reach the optimum value of 0.60 at any time of the year: the maximum is 0.58 in the chernozems of Northern Kazakhstan, 0.55–0.57 in the southern chernozems and piedmont sierozems, and only 0.42–0.43 in the Caspian and Aral Sea areas.

Moreover, the highest moisture content everywhere occurs from November to April, when soil temperature is close to zero or negative. In other words, throughout Kazakhstan heat and soil water are systematically separated in time, and biological activity is realised only within narrow transitional intervals. This is the main structural finding of the study, and it directly determines the logic of applying microbial preparations.

On the discrepancy between the process-based and empirical estimates. The largest differences between the two ways of calculating mineralisation were obtained for stations with a winter precipitation maximum: at Shymkent and Almaty the empirical regression gave 1217 and 1321 against 753 and 811 g C m^{-2} yr^{-1} from the model, whereas at Turkistan and Kyzylorda, conversely, 228 and 129 against 516 and 392. The reason is that regression (3) relies on annual precipitation, whereas what matters for the microbial community is the coincidence of precipitation with the warm period. Under the Mediterranean-type moisture regime of southern Kazakhstan the annual total systematically overestimates the biologically available water, while in the desert zone, where a consi-

derable part of the activity occurs in short spring periods, it underestimates it. The process-based model, which works with a daily water balance, is free of this distortion; the discrepancy should be regarded as an argument in favour of the process-based approach when zoning arid territories.

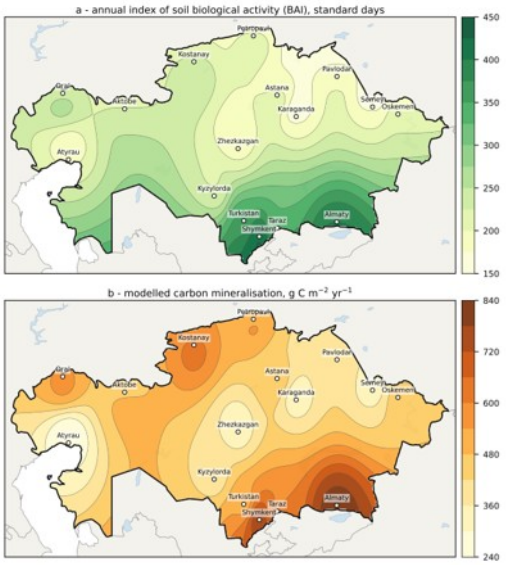


Figure 2 – Spatial distribution of the annual index of soil biological activity and of calculated carbon mineralisation over the territory of Kazakhstan

A fundamental limitation should also be noted. Analysis of the SRDB-V5 subset shows that in a dry continental climate annual precipitation correlates with carbon efflux (r=0.43), whereas mean annual temperature practically does not (r=−0.05).

The model, in an experiment with single perturbations, gives the opposite picture: a temperature increase of 1°C raises BAI by 8.1–9.8%, while a 10% increase in precipitation raises it by only 0.4–2.1%. The contradiction is explicable: at a fixed humus content the model describes the direct abiotic control of the mineralisation rate, whereas in nature moisture also governs plant productivity, that is, the input of fresh substrate.

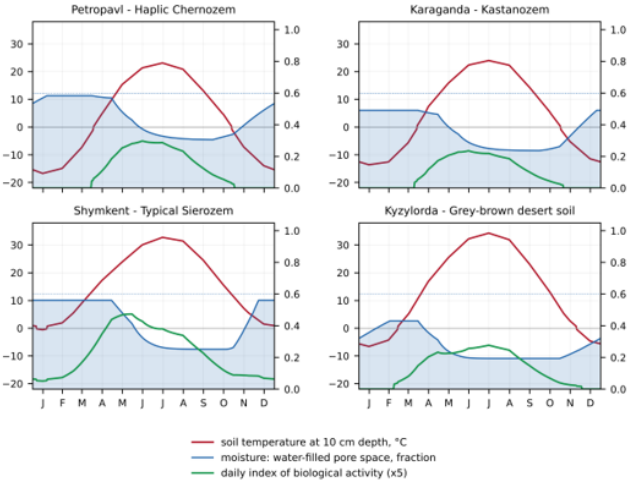


Figure 3 – Seasonal dynamics of soil temperature, moisture and the daily index of biological activity under contrasting soil-climatic conditions

This feedback loop is not reproduced in the present version of the model and must be taken into account when interpreting the scenario estimates.

Biotechnological windows. The calendar position and duration of the three windows identified are shown in figure 4. The inoculation window is open everywhere, but its duration differs more than twofold - from 32 days at Atyrau to 75 at Oskemen - and its timing shifts by almost one and a half months: at Shymkent and Turkistan it opens in the first ten days of March, at Petropavl only in the second ten days of April. The practical conclusion is straightforward: a single nationwide regulation for pre-sowing seed treatment with microbial preparations is impossible, and in zones with a short window (the Aral Sea area, the Caspian area, Central Kazakhstan) a delay of ten days in sowing means the loss of one third of the period suitable for establishment.

The nitrogen-fixation window is distributed far more unevenly - from zero at Atyrau and 4–7 days at Zhezkazgan and Kyzylorda to 84 days at Almaty. Over a considerable part of the dry-steppe and desert zone, conditions for diazotroph activity in rainfed crops are in fact absent, and the use of preparations based on nitrogen-fixing bacteria without irrigation is physically meaningless there. In the piedmont zone, by contrast, the duration of the window is comparable with the length of the growing season of grain legumes.

The most contrasting picture is given by the crop-residue decomposition window. In the steppe zone it lasts 75–85 days owing to autumn rains while soil temperatures are still positive, in the piedmont zone 103–117 days, while at five stations of the dry-steppe and desert zone (Karaganda, Semey, Zhezkazgan, Atyrau, Kyzylorda) it is completely closed: by August soil water storage is exhausted, and autumn precipitation falls when temperatures are already low. This explains the poor straw decomposition in Central Kazakhstan long known to practitioners and shows that the application of cellulolytic preparations to stubble there has little prospect without water-conserving practices.

Biotechnological zoning. Ward clustering by five variables gave the best partition at four clusters (mean silhouette 0.51; figure 5). The resulting zones have a clear geographical and pedological interpretation (table 3).

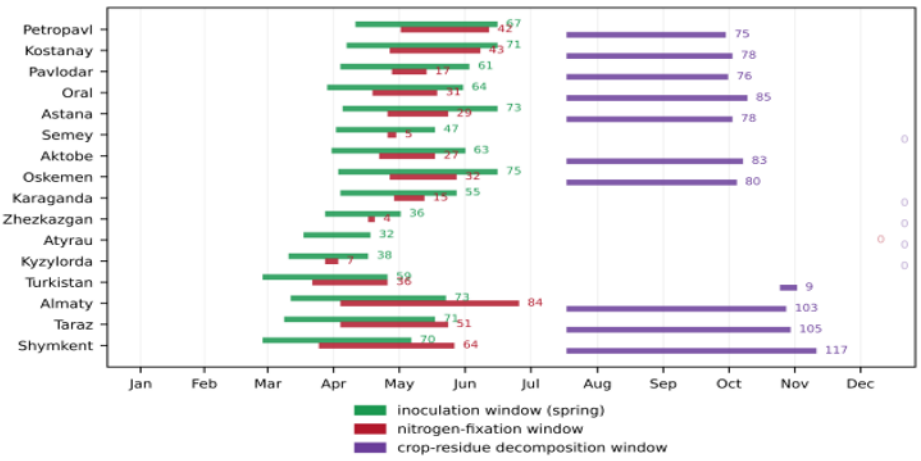


Figure 4 – Calendar of biotechnological windows by station (bars show the calendar position of each window, figures its duration in days; stations are ordered from north to south)

Zone I (Taraz, Shymkent, Almaty) comprises piedmont sierozems with the highest index (386 standard days) and the longest windows of all three types. With a low humus content (1.9%) the calculated mineralisation here is the highest - 722 g C m^{-2} yr^{-1} - that is, the turnover of organic matter is intensive while its stocks are small. This is a zone in which microbial preparations can work throughout almost the whole warm season but in which the task of returning organic matter to the soil is also the most acute.

Zone II is represented by a single station, Turkistan, and its separation is meaningful. The combination of high heat supply (index 356) with a severe water deficit gives a long inoculation window (59 days, from the beginning of March) with an almost complete absence of a decomposition window (9 days). This is an independent type of conditions requiring osmotolerant strains; it is precisely for such soils that results have been obtained with the halophilic *Bacillus* sp. PK-1 [5].

Zone III is the main agricultural belt of the republic (seven stations, chernozems and dark kastanozems). With a moderate index (215) it has the highest humus content (3.0%) and a stable autumn decomposition window (79 days). It is here that a domestic strain base also exists - isolates from the wheat rhizosphere of Akmola region [3].

Zone IV (dry-steppe and desert) is characterised by the lowest index (190), a short inoculation window (42 days), an almost zero nitrogen-fixation window (6 days) and a complete absence of a decomposition window. The use of microbial preparations here is confined to a narrow spring interval or requires irrigation.

Comparison of the zones with the published characteristics of Kazakhstani strains (table 4) shows that the existing collection base is distributed extremely unevenly among the zones: active isolates of local origin have been described for zones I–III, whereas for zone IV, which occupies the largest area, such data are practically absent. This indicates a priority direction for further work - a targeted search for drought-tolerant and osmotolerant strains in the soils of the dry-steppe and desert zones.

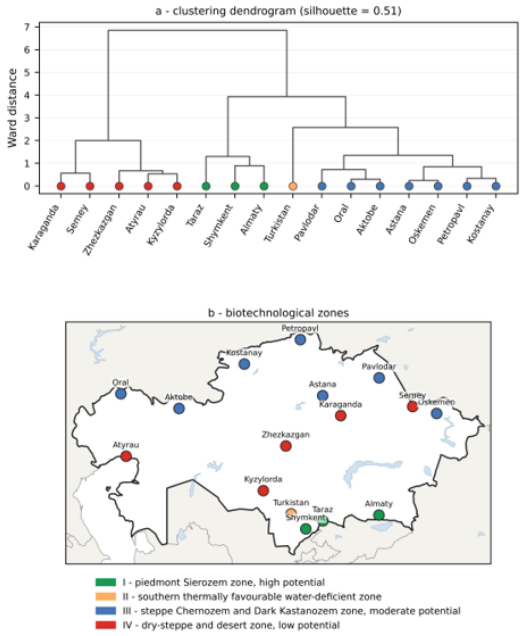


Figure 5 – Biotechnological zoning of the territory of Kazakhstan: a - dendrogram of Ward clustering of the stations; b - spatial position of the zones

Scenario estimates. By 2040–2059 the annual index of biological activity increases on average by 17.5% under RCP4.5 (from 16.1 to 19.2% across stations) and by 23.4% under RCP8.5 (from 21.4 to 24.9%); the calculated carbon mineralisation increases correspondingly (figure 6, table 5).

The increase is due almost entirely to the temperature component: the sum of the thermal function grows by 22–28%, whereas the mean moisture function decreases by only 0.5–2.7%, since the 12–18% rise in potential evapotranspiration is partly compensated by increased precipitation, and at the driest points soil water is already fully exhausted in the baseline period.

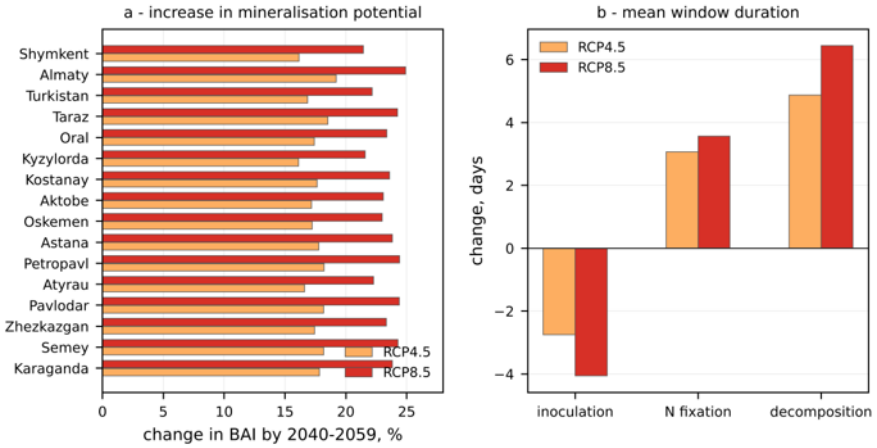


Figure 6 – Changes in the indicators of soil biological activity by 2040–2059 under the RCP4.5 and RCP8.5 scenarios

The biologically active period lengthens on average by 14 (RCP4.5) and 18 (RCP8.5) days. The changes in the individual windows are, however, of opposite sign. The crop-residue decomposition window increases by 5–6 days and the nitrogen-fixation window by 3–4 days, whereas the inoculation window, on the contrary, is shortened on average by 3–4 days, and at Kostanay and Astana by 12–15 days. The reason is that the spring crossing of the upper limit of the mesophilic optimum (25°C) by soil temperature occurs earlier, while the lower limit shifts only slightly. Thus, in the main agricultural belt of the republic the period suitable for the establishment of mesophilic cultures introduced at sowing will contract, and the need for thermotolerant strains will increase.

The picture obtained has a quite definite agroecological consequence. An increase in mineralisation potential with an unchanged or declining input of plant residues means accelerated dehumification, that is, a continuation of the trend already recorded for the chernozems of the republic [1, 2]. Under these conditions the main task of soil biotechnology becomes not so much the stimulation of mineralisation as the management of the organic matter balance: the use of decomposers must be combined with straw return and green manuring, and inoculation with practices that increase the input of root exudates and root biomass.

Table 3 – Biotechnological zones of Kazakhstan and recommended directions for the application of microbial preparations

Zone	Stations	Humus, %	BAI, standard days	R_s, g C m^{-2} yr^{-1}	Inoculation window, days	N-fixation window, days	Decomposition window, days	Priority directions of biotechnology
I - piedmont Sierozem zone	Taraz, Shymkent, Almaty	1.90	386	722	71	66	108	Full range: pre-sowing inoculation, associative and symbiotic diazotrophs, cellulolytic preparations applied to plant residues
II - southern thermally favourable water-deficient zone	Turkistan	1.10	356	516	59	36	9	Inoculation with halotolerant and osmotolerant strains; decomposers only under irrigation or when residues are incorporated into a moist layer
III - steppe Chernozem and Dark Kastanozem zone	Petropavl, Kostanay, Astana, Oral, Aktobe, Pavlodar, Oskemen	3.01	215	493	68	32	79	Pre-sowing inoculation and autumn stubble decomposition; nitrogen fixers for grain legumes in the wettest subzones
IV - dry-steppe and desert zone	Karaganda, Semey, Zhezkazgan, Atyrau, Kyzylorda	1.55	190	327	42	6	0	Inoculation with drought-tolerant strains within a short spring period; preparations based on nitrogen fixers and decomposers only in irrigated farming

Table 4 – Published characteristics of strains isolated from the soils of Kazakhstan and their correspondence to the biotechnological zones identified

Strains	Source of isolation	Zone	Main established effect	Reference
Pseudomonas fluorescens AK-4, *Bacillus cereus* TB-1, *Enterobacter cloacae* KB-2, ShB-2, T-3, *E. ludwigii* TB-2, *Staphylococcus epidermidis* ChK-4	Wheat rhizosphere, Akmola region	III	Wheat seedling length 14.7–15.3 cm against 10.1 cm in the control	[3]
44 strains of micromycetes and yeasts, including *Aspergillus* sp. T17, *Penicillium* sp. AC 14, *Cryptococcus* sp. K3	Agrocenoses of cereal, fodder and oil crops	III	Phosphate mobilisation in 24.9 % of isolates, cellulolytic activity in 16.4 %; barley biomass increase of 1.2–1.5-fold	[4]
Bacillus sp. PK-1 (halophilic)	Irrigated saline soils, Turkistan region	II	Maize yield increase of 15–35 %	[5]
Isolates of the genera *Pseudomonas*, *Agrobacterium*, *Bacillus*, *Arthrobacter*	Agrocenoses of fodder crops, Almaty region	I	Alfalfa seedling length 70.1 mm against 12.6 mm in the control; germination 65–85 %	[6]

Table 5 – Projection of soil biological activity indicators by zone for the period 2040–2059

Zone	BAI, baseline	BAI, RCP4.5	BAI, RCP8.5	R_s, baseline	R_s, RCP4.5	R_s, RCP8.5	Δ inoculation window, days	Δ N-fixation window, days	Δ decomposition window, days
I	386	455	476	722	852	892	-4	-2	+11
II	356	416	435	516	603	630	-3	+7	+12
III	215	252	265	493	580	609	-10	+4	+8
IV	190	223	234	327	384	403	+3	+6	+0

Note: BAI is expressed in standard days; R_s in g C m^{-2} yr^{-1}; Δ is the change in window duration under RCP8.5 relative to the baseline period.

Limitations of the study. The model operates with climate normals and describes mean long-term conditions, without reproducing the interannual variability that is very large in Kazakhstan. Snow accumulation and spring snowmelt are taken into account implicitly, through the replenishment of soil water storage at zero winter evaporation. Soil-zonal parameters were averaged for each zone and do not reflect intrazonal heterogeneity, in particular solonetzicity and salinity, which suppress microbial activity in their own right. Humus content was assumed constant, so that the feedback "moisture - productivity - substrate input" is not reproduced; as shown above, this is precisely what explains the divergence from the empirical relationships of the SRDB-V5 database. Finally, the boundaries of the biotechnological windows were set according to generalised physiological requirements of mesophilic soil bacteria and must be refined experimentally for particular strains.

CONCLUSION

A process-based model of soil biological activity in Kazakhstan was developed and verified, linking climate normals, the hydrophysical properties of soil zones and published response functions of the microbial community to temperature and moisture. The temperature module reproduced the observed annual course of soil temperature with a coefficient of determination of 0.997 and a standard error of 1.0°C; the calculated carbon mineralisation agreed with field measurements at Shortandy and with an independent empirical estimate based on the global SRDB-V5 database (r=0.80). It was established that the annual index of biological activity varies 2.5-fold across the republic and the calculated carbon mineralisation ranges from 254 to 811 g C m^{-2} yr^{-1}, the spatial series of the index being almost in antiphase with that of humus content. It was shown that at no station does water-filled pore space reach the optimum of 0.60, and that the period of highest moisture everywhere falls in the cold season, as a result of which biological activity is realised only within narrow transitional intervals in spring and autumn. Three biotechnological windows were introduced and calculated - inoculation (32–75 days), nitrogen fixation (0–84 days) and crop-residue decomposition (0–117 days). Ward clustering identified four biotechnological zones (mean silhouette 0.51), for each of which priority directions for the application of microbial preparations were substantiated. It was established that in the dry-steppe and desert zone the decomposition window is completely closed, which makes the application of cellulolytic preparations to stubble there unpromising without water-conserving practices. Under the RCP4.5 and RCP8.5 scenarios the index of biological activity increases by 17.5 and 23.4% by 2040–2059, the biologically

active period lengthens by 14 and 18 days, the nitrogen-fixation and decomposition windows widen, while the inoculation window in the main agricultural belt contracts by 12–15 days. This implies a growing mineralisation pressure on soil organic matter together with a narrowing of the period suitable for the introduction of mesophilic strains, and it defines two practical priorities: the search for thermo- and drought-tolerant strains of local origin, above all for the dry-steppe and desert zones, and the obligatory combination of microbial preparations with practices that return organic matter to the soil.

REFERENCES

1. Belgibayev M.E. Problemy sokhraneniya pochv stepnoj zony Kazakhstana. – Semej: Universitet imeni Shakarima, 2021. – S. 120–124. – DOI: 10.24412/cl-36359-2021-120-124.

2. Kuryshbayev A.K., Zvyagin G.A., Yaroslavtseva N.V., Kogut B.M. Agrogennaya transformatsiya organicheskogo veshchestva chernozemov Kazakhstana // Samarskij nauchnyj vestnik. – 2016. – T. 5, № 3. – S. 35–39. – DOI: 10.17816/snv20163107.

3. Bisenova G.N., Sadykova B.Zh., Mussabayeva B.K., Tekebayeva Zh.B., Sarmurzina Z.S., Temirkhanov A.Zh. Otsenka roststimuliruyushchej aktivnosti mikroorganizmov, vydelennykh iz pochvy Akmolinskoj oblasti // Vestnik Evrazijskogo natsional'nogo uni-versiteta imeni L.N. Gumileva. Seriya: Biologicheskie nauki. – 2022. – № 3(140). – S. 47–59. – DOI: 10.32523/2616-7034-2022-140-3-47-59.

4. Brazhnikova E.V., Mukasheva T.D., Ignatova L.V. Skrining shtammov mikromitsetov, perspektivnykh dlya stimulyatsii rosta sel'skokhozyajstvennykh kul'tur // Eksperimental'naya biologiya. – 2019. – № 3(80). – S. 40–47. – DOI: 10.26577/eb-2019-3-b4.

5. Karabaeva I.Z., Ultanbekova G.D., Sydykbekova Zh.K., Saparov S.S., Tokseitov N., Serikbay G.B., Abay A.K. Vliyanie galofil'nykh mikroorganizmov Bacillus sp. PK-1 na rost i razvitie kukuruzy v usloviyakh oroshaemykh zasolennykh pochv Turkestanskoj oblasti // Eurasian Journal of Ecology. – 2020. – Vol. 62, № 1. – P. 18–26. – DOI: 10.26577/EJE.2020.v62.i1.02.

6. Zhumagalieva Zh., Aimagambetova Zh., Nesterova A., Shukeshova S., Tokesh B., Berzhanova R.Zh., Mukasheva T.D. Otsenka roststimuliruyushchej aktivnosti mikroorganizmov, vydelennykh iz razlichnykh substratov // Vestnik KazNU. Seriya ekologicheskaya. – 2014. – № 2(41). – S. 199–203.

7. Perez-Quezada J.F., Saliendra N.Z., Akshalov K., Johnson D.A., Laca E.A. Land use influences carbon fluxes in northern Kazakhstan // Rangeland Ecology & Management. – 2010. – Vol. 63, № 1. – P. 82–93. – DOI: 10.2111/08-106.1.

8. Shein E.V. Kurs fiziki pochv. – M.: Izd-vo Moskovskogo universiteta, 2005. – 432 s.

9. Kozhakhmetova E.P., Kozhakhmetov P.Zh. O klimate i ego izmenenii v gorode Astane // Gidrometeorologiya i ekologiya. – 2011. – № 2. – S. 7–14.

10. Zheng D., Hunt E.R. Jr., Running S.W. A daily soil temperature model based on air temperature and precipitation for continental applications // Climate Research. – 1993. – Vol. 2. – P. 183–191.

11. Thornthwaite C.W. An approach toward a rational classification of climate // Geographical Review. – 1948. – Vol. 38, № 1. – P. 55–94.

12. Lloyd J., Taylor J.A. On the temperature dependence of soil respiration // Functional Ecology. – 1994. – Vol. 8, № 3. – P. 315–323.

13. Linn D.M., Doran J.W. Effect of water-filled pore space on carbon dioxide and nitrous oxide production in tilled and nontilled soils // Soil Science Society of America

Journal. – 1984. – Vol. 48, № 6. – P. 1267–1272. – DOI: 10.2136/sssaj1984.03615995004-800060013x.

14. Moyano F.E., Vasilyeva N., Bouckaert L., Cook F., Craine J., Curiel Yuste J., Don A., Epron D., Formanek P., Franzluebbers A., Ilstedt U., Kätterer T., Orchard V., Reichstein M., Rey A., Ruamps L., Subke J.-A., Thomsen I.K., Chenu C. The moisture response of soil heterotrophic respiration: interaction with soil properties // Biogeosciences. – 2012. – Vol. 9, № 3. – P. 1173–1182. – DOI: 10.5194/bg-9-1173-2012.

15. Bond-Lamberty B., Thomson A. A global database of soil respiration data // Biogeosciences. – 2010. – Vol. 7, № 6. – P. 1915–1926. – DOI: 10.5194/bg-7-1915-2010.

16. Jian J., Vargas R., Anderson-Teixeira K., Stell E., Herrmann V., Horn M., Kholod N., Manzon J., Marchesi R., Paredes D., Bond-Lamberty B. A restructured and updated global soil respiration database (SRDB-V5) // Earth System Science Data. – 2021. – Vol. 13, № 2. – P. 255–267. – DOI: 10.5194/essd-13-255-2021.

17. Climate Risk Country Profile: Kazakhstan. – Washington: World Bank Group; Manila: Asian Development Bank, 2021. – 32 p.

18. Ward J.H. Jr. Hierarchical grouping to optimize an objective function // Journal of the American Statistical Association. – 1963. – Vol. 58, № 301. – P. 236–244.

19. Rousseeuw P.J. Silhouettes: a graphical aid to the interpretation and validation of cluster analysis // Journal of Computational and Applied Mathematics. – 1987. – Vol. 20. – P. 53–65.

ТҮЙІН

М.К. Тыныкулов[1], Р.К. Пернебекова[2,3], Р.У. Мамыкова[4], Г.С. Жакипбекова[3], Н.В. Малицкая[5], А.К. Мухтаров[1]

ҚАЗАҚСТАН ТОПЫРАҚТАРЫНЫҢ БИОЛОГИЯЛЫҚ БЕЛСЕНДІЛІГІН АГРОКЛИМАТТЫҚ МОДЕЛЬДЕУ ЖӘНЕ АУМАҚТЫ МИКРОБТЫ БИОПРЕПАРАТТАРДЫ ҚОЛДАНУ ӘЛЕУЕТІ БОЙЫНША АЙМАҚТАРҒА БӨЛУ

[1]Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан

[2]Қожа Ахмет Яссауи атындағы Халықаралық Қазақ-Түрік университеті, жоғары оқу орнынан кейінгі медициналық білім беру факультеті, Түркістан, Қазақстан

[3]Оңтүстік Қазақстан медицина академиясы, медицина факультеті, Шымкент, Қазақстан

[4]Жәнібеков Университеті, Жаратылыстану ғылымдары факультеті, Шымкент, Қазақстан

[5]М. Қозыбаев атындағы Солтүстік Қазақстан мемлекеттік университеті, Петропавл, Қазақстан, e-mail: mr.tynykulov@mail.ru

Қазақстанның дала жағдайында микробтық биопрепараттардың тиімділігі тұрақсыз болып қалуда, оның басты себептерінің бірі - абиотикалық шектеулер: енгізілген микроорганизмдер топырақ температурасы мен ылғалдылығының тар ауқымында ғана тамырлана алады, ал күрт континенттік климатта бұл ауқым ұзаққа ашылмайды. Жұмыстың мақсаты - Қазақстан топырақтарының биологиялық белсенділігінің маусымдық динамикасын сандық түрде сипаттау және осының негізінде биопрепараттарды қолдану әлеуеті бойынша ерекшеленетін аймақтарды бөліп көрсету. 16 метеостанцияның 1991–2020 жж. климаттық нормалары бойынша 10 см тереңдіктегі топырақ температурасы, 0–50 см қабатының тәуліктік су балансы және Ллойд–Тейлордың термиялық функциясы мен сумен толтырылған кеуек кеңістігінің үлесі арқылы берілген ылғалдану функциясының көбейтіндісі ретінде биологиялық белсенділіктің тәуліктік индексі есептелетін процестік модель әзірленді. Температуралық блок Астана станциясының жарияланған топырақ

температурасы нормалары бойынша тексерілді (R^2=0,997; стандартты қате 1,0°C), көміртектік блок - Шортандыдағы CO_2 эмиссиясының далалық өлшемдері және жаһандық SRDB-V5 базасының 261 жазбасы бойынша. Жылдық индекс аумақ бойынша 2,5 есе, ал көміртектің есептік минералдануы 254-тен 811 г С/(м^2·жыл) дейін өзгереді. Инокуляция, азотфиксация және өсімдік қалдықтарын ыдырату деген үш биотехнологиялық терезе енгізілді; олардың ұзақтығы тиісінше 32–75, 0–84 және 0–117 тәулікті құрайды. Уорд әдісімен кластерлеу төрт биотехнологиялық аймақты бөліп шығарды (силуэт 0,51). RCP4.5 және RCP8.5 сценарийлері бойынша 2040–2059 жж. индекс 17,5 және 23,4%-ға артады, инокуляция терезесі қысқарады, ал ыдырату терезесі ұзарады, бұл биотехнологияның басымдығын минералдануды ынталандырудан топырақтың органикалық затын сақтауға қарай ығыстырады.

Түйінді сөздер: топырақтың биологиялық белсенділігі, топырақ микроорганизмдері, микробтық биопрепараттар, PGPR, көміртектің минералдануы, топырақтың су режимі, агроклиматтық аймақтарға бөлу, климаттың өзгеруі, ГАЖ.

РЕЗЮМЕ

М.К. Тыныкулов[1], Р.К. Пернебекова[2,3], Р.У. Мамыкова[4], Г.С. Жакипбекова[3], Н.В. Малицкая[5], А.К. Мухтаров[1]

АГРОКЛИМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ БИОЛОГИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ ПОЧВ КАЗАХСТАНА И ЗОНИРОВАНИЕ ТЕРРИТОРИИ ПО ПОТЕНЦИАЛУ ПРИМЕНЕНИЯ МИКРОБНЫХ БИОПРЕПАРАТОВ

[1]Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан

[2]Международный Казахско-Турецкий университет им. Ходжи Ахмета Яссауи, Факультет последипломного высшего медицинского образования, Туркестан, Казахстан

[3]Южно-Казахстанская медицинская академия, Медицинский факультет, Шымкент, Казахстан

[4]Университет им. Жанибекова, Факультет естественных наук, Шымкент, Казахстан

[5]Северо-Казахстанский государственный университет им. М. Козыбаева, Петропавловск, Казахстан, e-mail: mr.tynykulov@mail.ru

Эффективность микробных биопрепаратов в полевых условиях Казахстана остаётся нестабильной, и одной из главных причин этого являются абиотические ограничения: интродуцированные микроорганизмы способны приживаться и работать лишь в узком диапазоне температуры и влажности почвы, который в резко континентальном климате открыт недолго. Цель работы - количественно описать сезонную динамику биологической активности почв Казахстана и на этой основе выделить зоны, различающиеся по потенциалу применения биопрепаратов. Разработана процессная модель, в которой по климатическим нормам 1991–2020 гг. 16 метеостанций рассчитываются температура почвы на глубине 10 см, суточный водный баланс слоя 0–50 см и суточный индекс биологической активности как произведение термической функции Ллойда–Тейлора и функции увлажнения, заданной через долю занятого водой порового пространства. Температурный блок верифицирован по опубликованным нормам температуры почвы ст. Астана (R^2=0,997; стандартная ошибка 1,0°C), углеродный - по полевым измерениям эмиссии CO_2 в Шортандах и по выборке из 261 записи глобальной базы SRDB-V5. Годовой индекс изменяется по территории в 2,5 раза, а расчётная минерализация углерода - от 254 до 811 г С/(м^2·год). Введены три биотехнологических окна - инокуляции, азотфиксации и деструкции растительных остатков; их длительность составляет соответственно 32–75, 0–84 и 0–117 суток. Кластеризация методом Уорда выделила четыре биотехнологические зоны (силуэт 0,51).

По сценариям RCP4.5 и RCP8.5 к 2040–2059 гг. индекс возрастает на 17,5 и 23,4%, окно инокуляции сокращается, а окно деструкции удлиняется, что смещает приоритет биотехнологии от стимуляции минерализации к сбережению органического вещества почв.

Ключевые слова: биологическая активность почв, почвенные микроорганизмы, микробные биопрепараты, PGPR, минерализация углерода, водный режим почв, агроклиматическое зонирование, изменение климата, ГИС.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

1. Tynykulov Marat Korganbekovich, Candidate of Agricultural Sciences, associate professor, the main author, https://orcid.org/0000-0002-4878-4030,
e-mail: tynykulov@list.ru.

2. Pernebekova Rakhat Karimbekovna, Candidate of Biological Sciences, associate Professor, Faculty of Postgraduate Higher Medical Education, https://orcid.org/0000-0002-9652-1729, e-mail: rakhat_71@mail.ru

3. Mamykova Roza Ubaidyalayevna, Candidate of Biological Sciences, associate Professor., Faculty of Natural Sciences, https://orcid.org/0000-0002-0085-6744,
e-mail: roza.mamykova@mail.ru

4. Zhakipbekova Galiya Saparovna, Candidate of biological sciences, professor, https://orcid.org/0009-0008-1842-4561, e-mail: zhakipbekova.1974@mail.ru

5. Malitskaya Natalya Vladimirovna, Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor of the Department "Agronomy and forestry", e-mail: natali_gorec@mail.ru

6. Mukhtarov Abilkhas Kapizovich, Candidate of chemical sciences, associate professor, https://orcid.org/0000-0001-9020-2551, e-mail: Abilkhas@mail.ru

БИОЛОГИЯ ПОЧВ

SRSTI 68.05.45

DOI: 10.51886/1999-740X_2026_4_21

R. Aipova[1], A.A. Kurmanbaev[1]*, Sh.G. Yermek[1], A.K. Amanbossyn[1], S.I. Tanirbergenov[1]

ASSESSMENT OF BIOLOGICAL ACTIVITY AND SOIL HEALTH PARAMETERS OF VARIOUS SOIL TYPES IN THE ZHETYSU REGION

[1]Kazakh Research Institute of Soil Science and Agrochemistry named after U.U. Uspanov, 050060, Almaty, Al-Farabi ave., 75B, Kazakhstan,

**e-mail: wberel@gmail.com*

Abstract. This study presents a comprehensive assessment of the biological condition of the humus horizons of meadow-serozem, foothill light chestnut, chestnut, and mountain dark chestnut soils in the Zhetysu Region of Kazakhstan, based on investigations conducted in virgin and cultivated areas during the spring and autumn seasons. The abundance of the main physiological and trophic groups of microorganisms was determined using culture-based methods, enzymatic activity was assessed using the fluorescein diacetate (FDA) hydrolysis assay, and structural and morphological characteristics were analyzed using Pfeiffer's circular chromatography method. Considerable seasonal variation and differences among soil types were observed in the biological indicators. The total microbial count decreased from 126.0×10^6 to 21.83×10^6 CFU/g of soil, while the maximum abundances of actinomycetes and bacteria utilizing mineral forms of nitrogen reached 180.0×10^5 and 174.67×10^5 CFU/g of soil, respectively. FDA hydrolytic activity reached 40.5 μg of fluorescein per gram of soil over a 3-hour incubation period. According to the circular chromatography results obtained in autumn, the central zone radius (CR) ranged from 21 to 27, the outer zone width (OZ) from 38 to 49, and the total radius (TR) from 96 to 110, with a relatively stable number of concentric rings (5–6). Virgin soils exhibited higher biological activity, whereas changes in biological indicators associated with land-use practices were observed in cultivated soils. These findings highlight the importance of integrating physical, chemical, and biological indicators when assessing soil condition and developing measures to preserve soil fertility.

Keywords: soil, microbial communities, enzymatic activity, bacteria, circular chromatography, soil fertility.

INTRODUCTION

Soil is a strategically important natural resource that supports food production. At the same time, degradation processes have affected approximately one-third of the world's agricultural soils [1], posing a serious threat to food security and sustainable development for both present and future generations. Kazakhstan ranks ninth in the world in terms of land area and is characterized by considerable soil diversity, comprising more than 700 soil types that differ in their chemical, physicochemical, and agrochemical properties, as well as in their degree of natural fertility. Soil formation in Kazakhstan occurs predominantly under arid and extreme climatic conditions. Consequently, these soils are particularly vulnerable to degradation and desertification and exhibit low resilience to anthropogenic disturbances [2].

In recent years, there has been a steady increase in the number of studies investigating soil microbial communities in the context of assessing soil biological health. Soil, as a habitat for microorganisms, is a complex heterogeneous system whose functioning is determined by a combination of interrelated and dynamically changing factors. Anthropogenic disturbances induce diverse responses in soil microbial communities, depending on their structural organization, taxonomic composition, and functional potential. Effective management of microbiological processes in soil requires reliable in-

formation on the quantitative and qualitative composition of its microbial communities [3]. However, a systematic understanding of the structure and diversity of soil microbial communities in Kazakhstan is currently lacking. In this regard, the microbiological characterization of different soil types is particularly important for studying, conserving, and sustainably utilizing ecosystem biodiversity [4].

One of the most pressing environmental issues of the past decade has been the deterioration of soil health, particularly the decline in soil organic matter content, largely driven by climate change [5]. The need for regular monitoring of soil organic matter content [6] is determined by its close functional relationship with soil properties such as acidity (pH), particle size distribution, moisture content, and mineral component content, as emphasized by Bot and Benites [7]. According to Graciano et al. [8], the high variability in the molecular structure of soil organic matter presents a significant methodological challenge in assessing humus content and microbiological activity. Furthermore, parameters such as pH, total organic matter content, electrical conductivity, nitrogen, phosphorus, and potassium concentrations, and moisture content are generally considered in isolation [9], making it difficult to obtain a comprehensive assessment of soil condition.

The aim of this study is to comprehensively assess the biological activity of Kazakhstan's soils as an integral indicator of their ecological and agroecological condition.

MATERIALS AND METHODS

The study focused on the humus horizons of subzonal soil subtypes in the foothill regions of Kazakhstan, including meadow-serozem, foothill light chestnut, chestnut, and mountain dark chestnut soils.

The bacterial composition of soils was investigated using samples collected from virgin and arable land plots at six test sites in the Zhetysu Region (Republic of Kazakhstan), representing Serozem (07 T/21), Light Chestnut Soil (12 T/21), and Dark Chestnut Soil (13 T/21) during different seasons (spring–autumn 2024).

Microbiological and enzymatic activities were determined using freshly collected soil samples in triplicate. Soil samples were collected using a soil auger from a depth of 0–10 cm at five points within each test site in accordance with ST RK ISO 18400-105-2018 and standard methods [10, 11]. Prior to analysis, the samples were stored at +4°C. Soil samples were prepared for microbiological analysis using generally accepted methods [12].

Microorganisms were enumerated using the plate count method on selective culture media: Sabouraud agar for filamentous fungi; universal medium (UM) for bacteria; starch-ammonia agar (SAA) for actinomycetes; Ashby's medium for nitrogen-fixing bacteria; and KBS medium for coryneform bacteria [12]. Additionally, the fluorescein diacetate (FDA) hydrolysis assay was performed [13]. Colonies were counted 3–7 days after inoculation, and plating was performed in triplicate. Incubation was carried out at 28–30 °C for 3–10 days. Microbial abundance was expressed as colony-forming units per gram of soil (CFU/g). Soil health was assessed using Pfeiffer's circular paper chromatography method [14], and the chromatograms were interpreted according to methodological guidelines [15].

The Pfeiffer method complements microbiological and FDA-based methods by providing an indirect characterization of the condition and structural organization of the soil organomineral complex based on the morphological features of chromatograms. Its application complements quantitative measures of microbial abundance and enzymatic activity by providing additional information on the structural and functional condition of the soil.

The research was conducted at the Microbiology Laboratory of the Depart-

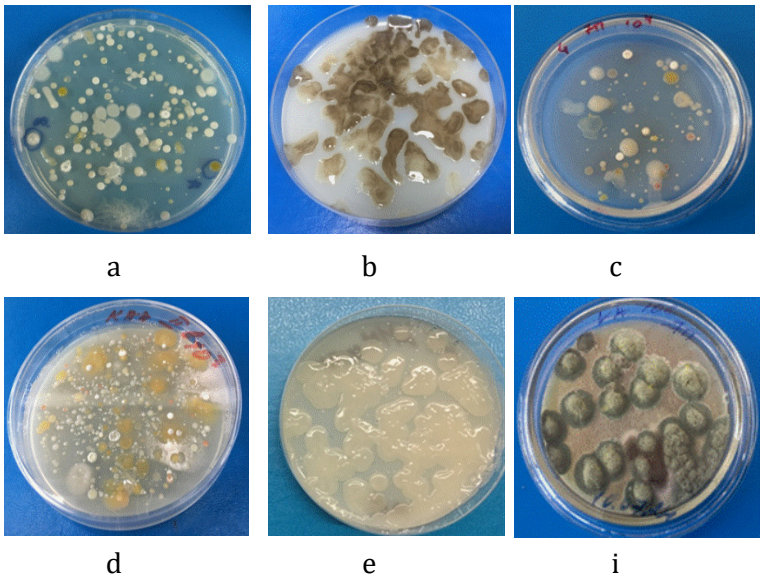
ment of Soil Fertility and Biology, U.U. Uspanov Kazakh Research Institute of Soil Science and Agrochemistry.

Data are presented as means ± standard error (SE). All analyses were performed in triplicate (n=3). Statistical analyses were conducted using Microsoft Excel. The standard deviation (SD) was calculated from the replicate measurements, and the standard error (SE) was calculated as $SD/\sqrt{n}$.

RESULTS AND DISCUSSION

During the study, various groups of microorganisms were isolated using standard methods, including fungi, bacteria, nitrogen-fixing microorganisms, coryneform bacteria, microorganisms capable of utilizing mineral forms of nitrogen, actinomycetes, and yeasts (figure 1).

During the spring season, high abundances of bacteria, actinomycetes, and coryneform microorganisms were recorded in virgin soils, whereas in autumn, a decrease in total microbial abundance and changes in the composition of the dominant taxonomic groups were observed (figure 2).



a – universal medium (UM); b – Ashby's medium; c – starch-ammonia agar (SAA); d – KBS medium; e – KG medium; i – Sabouraud medium.

Figure 1 – Morphology of microbial colonies grown on different selective culture media

Seasonal changes in the abundance and structure of microbial communities may be associated with fluctuations in temperature and moisture conditions and the availability of organic matter, potentially contributing to microbial activation in spring, followed by a decline in microbial abundance and changes in community structure during autumn.

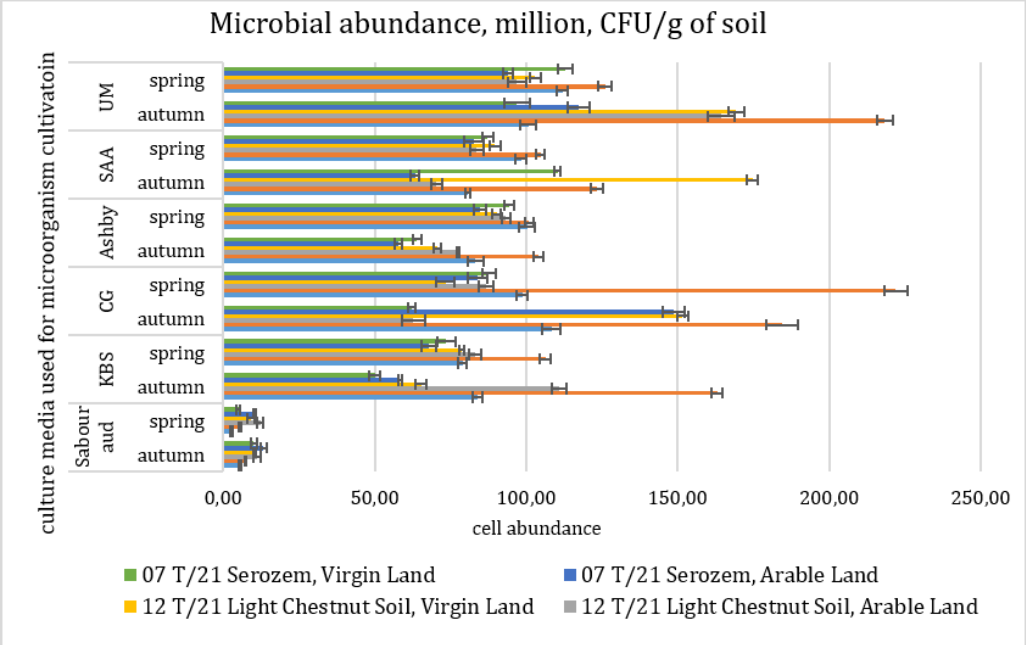


Figure 2 – Total microbial count in the experimental treatments: virgin and cultivated soils

The data presented in the figure indicate that bacteria and actinomycetes were the dominant groups of microorganisms in the soil samples, whereas fungal abundance was two orders of magnitude lower. A comparison of total microbial abundance showed that the number of colony-forming units per gram of soil was approximately the same across all samples. The distribution of the enumerated microbial groups was characterized by the following orders of magnitude: bacteria – $\times 10^5$, fungi – $\times 10^2$, and actinomycetes – $\times 10^4$.

Seasonal dynamics in soil microbial abundance showed considerable differences depending on soil type and sampling period. In spring, the highest abundance of bacteria and actinomycetes was recorded in 13 T/21 Dark Chestnut Soil, Virgin Land, at 222.0×10^5 CFU/g of soil, while the lowest abundance was observed in 12 T/21 Light Chestnut Soil, Virgin Land, at 73.33×10^5 CFU/g of soil. The higher microbial abundance in dark chestnut soil may have been associated with a higher organic matter content and favorable hydrothermal conditions.

In autumn, total microbial abundance decreased to 21.83×10^6 CFU/g of soil, compared with 126.0×10^6 CFU/g of soil in spring. This decrease may have been associated with a seasonal decline in soil temperature and reduced availability of readily decomposable organic substrates. Nevertheless, the highest abundance of actinomycetes was still recorded in 13 T/21 Dark Chestnut Soil, Virgin Land, reaching 180.0×10^5 CFU/g of soil, whereas the lowest abundance was observed in 07 T/21 Serozem at 62.33×10^5 CFU/g of soil.

The abundance of nitrogen-fixing microorganisms and coryneform bacteria was generally higher in virgin soils than in arable soils and serozem soils. Seasonal differences were observed in the abundance of bacteria utilizing mineral forms of nitrogen: in spring, the highest abundance was recorded in 13 T/21 Dark Chestnut Soil, Virgin Land, at 104.67×10^5 CFU/g of soil, whereas in autumn, it was recorded in 12 T/21 Light Chestnut Soil, Virgin Land, at 174.67×10^5 CFU/g of soil. The abundance of micromycetes also varied depending on the season and soil type. In spring, the

highest value was recorded in 12 T/21 Light Chestnut Soil, Arable Land, at 12.33×10^3 CFU/g of soil, whereas in autumn, it was recorded in 07 T/21 Serozem, Arable Land, at 13.33×10^3 CFU/g of soil.

Overall, virgin soils, particularly dark chestnut soils, were characterized by higher abundances of certain functional groups of microorganisms. The autumn decline in total microbial abundance was accompanied by changes in the relative proportions of individual functional groups, including an increase in the abundance of bacteria utilizing mineral forms of nitrogen in certain soil treatments. These findings indicate that the structure and abundance of soil microbial communities vary depending on soil type and seasonal conditions, which may influence the intensity of biological processes involved in maintaining soil fertility.

One of the informative methods for assessing soil biological activity is the fluorescein diacetate (FDA) hydrolysis assay, which is based on the enzymatic hydrolysis of fluorescein diacetate by soil microorganisms. The rate of hydrolysis reflects the overall hydrolytic activity of the soil microbial community. The results of the assessment of soil biological activity using the FDA hydrolysis assay are presented in figure 3.

Assessment of soil enzymatic activity using the FDA hydrolysis assay (μg of fluorescein/g of soil over 3 h) revealed pronounced seasonal changes in biochemical activity in virgin and arable soils. In 07 T/21 Serozem, Virgin Land, FDA activity was approximately 27.5 μg/g in spring, exceeding that in 07 T/21 Serozem, Arable Land (17.0 μg/g). By autumn, the values had decreased to 10.0 and 6.3 μg/g, respectively. The decrease in activity may have been associated with seasonal soil drying and elevated summer temperatures, which may limit the metabolic activity of soil microbiota.

In 12 T/21 Light Chestnut Soil, Virgin Land, FDA activity in spring was 34.5 μg/g, compared with 28.5 μg/g in 12 T/21 Light Chestnut Soil, Arable Land. In autumn, FDA activity in 12 T/21 Light Chestnut Soil, Virgin Land, increased to 40.5 μg/g, reaching the highest value among all the treatments studied, whereas it decreased to 21.3 μg/g in 12 T/21 Light Chestnut Soil, Arable Land. In 13 T/21 Dark Chestnut Soil, Virgin Land, FDA activity in spring was 33.5 μg/g, compared with 16.8 μg/g in 13 T/21 Dark Chestnut Soil, Arable Land.

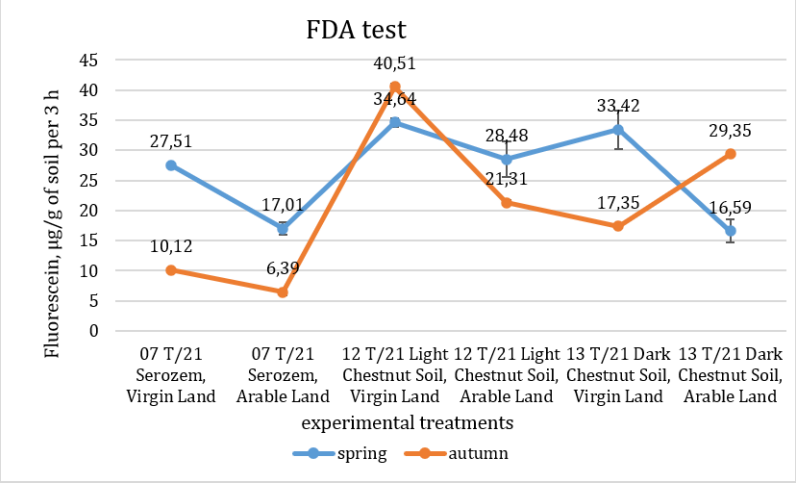


Figure 3 – Results of soil biological activity assessment using the FDA hydrolysis assay

In autumn, the value decreased to 17.3 μg/g in 13 T/21 Dark Chestnut Soil, Virgin Land, whereas it increased to 29.3 μg/g in 13 T/21 Dark Chestnut Soil, Arable Land. The increase in FDA activity in arable soil during autumn may have been associated with the input of fresh plant residues and changes in soil conditions following agricultural management practices, which may promote microbial activity.

Overall, the enzymatic activity of the investigated soils varied depending on soil genetic type, land use, and seasonal conditions. In spring, virgin soils exhibited higher FDA activity than arable soils.

This may be associated with the preservation of natural soil structure and greater organic matter inputs under undisturbed vegetation cover. Light chestnut and dark chestnut soils (12 T/21 Light Chestnut Soil and 13 T/21 Dark Chestnut Soil) exhibited higher FDA activity than serozem soil (07 T/21 Serozem). However, the pattern and magnitude of seasonal changes varied depending on soil genetic type and land use.

The Pfeiffer test is a method for the comprehensive assessment of the biological and functional condition of soils based on the morphometric and visual characteristics of circular chromatograms. Chromatogram interpretation takes into account the distribution of zones, radial channels, and spikes, as well as their color, size, shape, and degree of structural development. Together, these characteristics reflect patterns of organic matter distribution and provide a basis for assessing the structural and functional condition of soil microbial communities (figure 4).

Thus, the analysis of Pfeiffer chromatograms allows for a comprehensive characterization of soil condition based on a combination of morphological features, including the degree of development and spatial organization of zones, radial channels, and spikes, as well as their color and dimensional characteristics.

The intermediate zone is characterized by low levels of poorly integrated organic matter, whereas the outer zone indicates low enzymatic activity.

In virgin soils (07 T/21 Serozem, Virgin Land; 12 T/21 Light Chestnut Soil, Virgin Land; and 13 T/21 Dark Chestnut Soil, Virgin Land), the central zone was characterized by a low organic matter content in both spring and autumn.

However, the organic matter was integrated with mineral components, indicating high soil quality and good nutrient availability for microorganisms. Thus, the Pfeiffer test indicates higher soil quality and biological activity in virgin soils compared with arable soils and serozem soils.

For the interpretation of circular chromatograms, the radii of the zones forming the chromatogram were considered, including the overall radius (OR), the radius of the central zone, the widths of the intermediate and outer zones, and the numbers of channels, spikes, and concentric rings (figure 5), in accordance with the criteria proposed by Restrepo and Pinheiro [16].

A comparative analysis of soil samples collected from virgin and arable land plots during the spring and autumn seasons revealed pronounced seasonal variability in the investigated parameters, with the pattern and magnitude of these changes depending on soil type and land use. In all the investigated soils, a decrease in RCZ and an increase in outer zone width (OZ) were observed in autumn.

In 07 T/21 Serozem, Virgin Land, RCZ decreased from 50 to 25, while in 07 T/21 Serozem, Arable Land, it decreased from 55 to 23. Meanwhile, OZ increased from 21 to 47 and from 22 to 44, respectively. The overall radius (OR) increased from 105 to 110 in virgin soil but decreased from 107 to 97 in arable soil, accompanied by an increase in the number of channels and spikes in the chromatograms.

In 12 T/21 Light Chestnut Soil, Virgin Land, RCZ decreased from 65 to 27, while in 12 T/21 Light Chestnut Soil, Arable Land, it decreased from 58 to 26. Meanwhile, OZ increased from 18 to 38 and from 18 to 49, respectively. TR decreased from 110 to 96 in virgin soil and increased from 107 to 110 in arable soil, while the radial characteristics generally decreased.

In 13 T/21 Dark Chestnut Soil, Virgin Land, RCZ decreased from 58 to 25, while in 13 T/21 Dark Chestnut Soil, Arable Land, it decreased from 72 to 21.

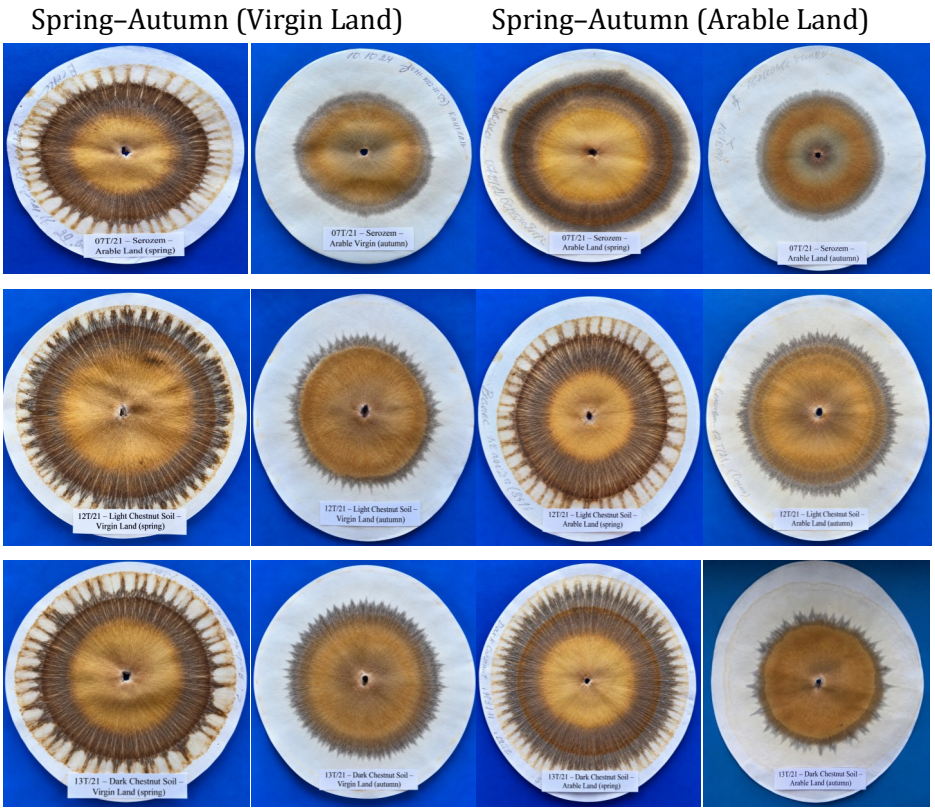


Figure 4 – Chromatograms of soil samples (virgin and cultivated soils) from agricultural crop cultivation sites

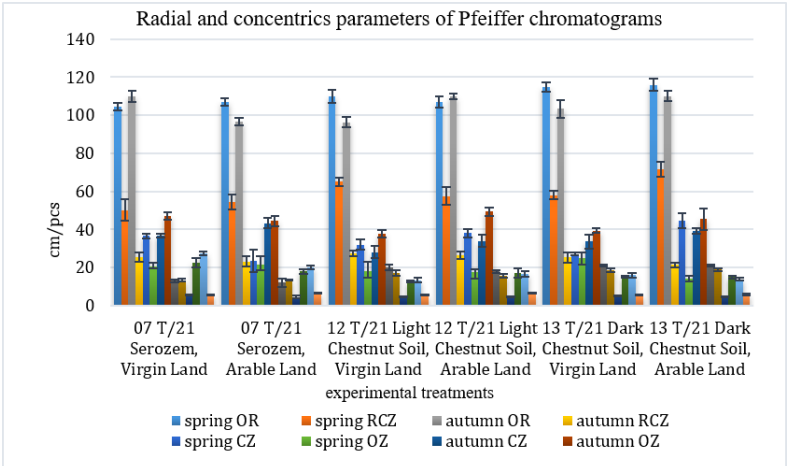


Figure 5 – Summary parameters of Pfeiffer chromatograms for the experimental treatments over the growing season (spring–autumn)

Meanwhile, OZ increased from 25 to 39 and from 14 to 45, respectively. TR decreased from 115 to 103 in virgin soil and from 116 to 110 in arable soil, accompanied by a reduction in the number of channels and spikes. The concentric characteristics of the chromatograms remained relatively stable, with 5–6 concentric rings.

Thus, the seasonal variation in the studied parameters may be associated with changes in soil moisture and temperature, microbial activity, and organic matter transformation. The observed differences between virgin and arable soils may be related to land-use practices. The combined use of culture-based methods, the FDA assay, and Pfeiffer circular paper chromatography provides complementary information on the abundance of specific microbial groups, overall hydrolytic activity, and chromatographic morphology, respectively, thereby enabling a more comprehensive assessment of the biological and structural-functional condition of the soil.

CONCLUSION

The study revealed differences in the seasonal dynamics of soil biological activity associated with soil type and land-use practices. Virgin soils, particularly dark chestnut soils, generally exhibited higher abundances of certain functional groups of microorganisms than arable soils. However, the magnitude and direction of seasonal changes varied among soil types and land-use treatments. In autumn, total microbial abundance decreased in most of the studied variants, whereas some functional groups, including mineral nitrogen-utilizing bacteria and micromycetes, maintained or increased their abundance. FDA activity also exhibited distinct seasonal patterns, with the direction and magnitude of changes varying among soil types and land-use treatments. Similar variability was observed in the morphological characteristics of the Pfeiffer chromatograms. Arable soils generally exhibited greater variability in individual microbiological indicators than their virgin counterparts. The most pronounced seasonal differences were observed in serozem and chestnut soils. These patterns may be associated with differences in soil type and land use that affect microbial community functioning, organic matter transformation, and the structural and functional condition of the soil.

Overall, the results indicate that soil biological activity varies according to soil type and land use, highlighting the importance of maintaining favorable biological and structural soil conditions. The identified patterns may be considered when developing adaptive land-use approaches aimed at maintaining biological activity and enhancing the resilience of arable soils.

The Pfeiffer circular paper chromatography method was used as an additional approach to assess soil condition. The morphological characteristics of the chromatograms complemented microbiological indicators and FDA activity measurements, providing an indirect characterization of the structural and functional condition of the soil organomineral complex.

FUNDING

This study was conducted within the framework of the program-targeted funding (PTF) project BR22885097, “Ensuring the Rational Use of Agricultural Land in Intensive Farming Based on New Approaches to the Conservation and Restoration of Soil Fertility,” funded by the Ministry of Agriculture of the Republic of Kazakhstan for 2024–2026.

REFERENCES

1. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Intergovernmental Technical Panel on Soils. Status of the World's Soil Resources: Main Report. – Rome: FAO, 2015. – 608 p.

2. Saparov A. S. Plodorodie pochvy i produktivnost' kul'tur. – Almaty: Izd-vo OO «DOIVA», 2006. – 244 s.

3. Ten Kh.M. Zakonomernosti formirovaniya i stabilizatsiya mikrobiotsenozov v pochve. - M.: Nauka, 1983. - 104 p.

4. Morales S.E., Cosart T.F., Johnson J.V., Holben W.F. Extensive phylogenetic analysis of a soil bacterial community illustrates extreme taxon evenness and the effects of amplicon length, degree of coverage, and DNA fractionation on classification and ecological parameters // Applied and Environmental Microbiology. - 2009. - Vol. 75. - P. 668–675.

5. Brevik E.C., Burgess L.C. Soils and Human Health // European Journal of Soil Science. - 2013. - Vol. 64. - P. 391–400.

6. Carneiro A.M., Campos J.O. The use of Pfeiffer chromatography as a tool for evaluating agroecological management in an agricultural property in the municipality of Boqueirão – PB // International Journal of Semiarid. - 2021. - Vol. 4. - P. 139–149.

7. Bekhit N., Faraoun F., Bennabi F., Ayache A., Toumi F., Lovynska V. Impact of Management Practices on Soil Organic Carbon Content and Microbial Diversity under Semi-Arid Conditions // Land. - 2025. - Vol. 14, № 5. - 19 p.

8. Graciano I., Matsumoto L.S., Demétrio G., Peixoto E.M. Evaluating Pfeiffer chromatography for its validation as an indicator of soil quality // Journal of Agricultural Studies. - 2020. - Vol. 8, № 3. - P. 420–446.

9. Bünemann E.K., Bongiorno G., Bai Z., Creamer R.E., de Deyn G., van der Goede R., Fleskens L., Geissen V., Kuyper T.W., Mäder P., Pulleman M., Sukkel W., Brussaard L. Soil quality – a critical review //Soil Biology and Biochemistry. -2018. - Vol. 120. - P. 105–125.

10. ST RK ISO 18400-101-2018. Kachestvo pochvy. Otbor prob. Chast' 101. Skhema podgotovki i primeneniya plana. – Astana: RGP «KazInSt», 2018. – 36 s.

11. Dospekhov B. A. Metodika polevogo opyta: s osnovami statisticheskoy obrabotki rezul'tatov issledovaniy. –5-e izd., dop. i pererab. –M.: Agropromizdat, 1985. – 351 s.

12. Metody mikrobiologicheskogo kontrolya pochvy: metodicheskie rekomendatsii. – M.: Federal'nyy tsentr gossanepidnadzora Minzdrava Rossii, 2004. – 21 s.

13. Kamysheva K. S. Mikrobiologiya, osnovy epidemiologii i metody mikrobiologicheskikh issledovaniy: uchebnoe posobie dlya studentov srednego professional'nogo obrazovaniya. – Rostov n/D: Feniks, 2016. – 346 s.

14. Green V.S., Stott D.E., Diack M. Assay for fluorescein diacetate hydrolytic activity: Optimization for soil samples // Soil Biology and Biochemistry. - 2006. - Vol. 38, № 4. - P. 693–701.

15. Kokornaczyk M.O., Primavera F., Luneia R., Baumgartner S., Betti L. Analysis of soils by means of Pfeiffer's circular chromatography test and comparison to chemical analysis results // Biological Agriculture and Horticulture. -2017. - Vol. 33, № 3. - P. 143–157.

16. Restrepo Rivera J., Pinheiro S. Cromatografía: imágenes de vida y destrucción del suelo. - Cali: Impresora Feriva, 2011. - 252 p.

ТҮЙІН

Р. Аипова[1], А.А. Құрманбаев[1]*, Ш.Ғ. Ермек[1], А.Қ. Аманбосын[1], С.И. Танирбергенов[1]

ЖЕТІСУ ОБЛЫСЫНЫҢ ӘРТҮРЛІ ТОПЫРАҚ ТҮРЛЕРІНІҢ БИОЛОГИЯЛЫҚ БЕЛСЕНДІЛІГІ МЕН ТОПЫРАҚ ДЕНСАУЛЫҒЫ КӨРСЕТКІШТЕРІН БАҒАЛАУ

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

Зерттеу барысында Жетісу облысының шалғынды сұр, тау бөктерінің ашық қара-қоңыр, қара-қоңыр және таулы қара-қоңыр топырақтарының тың және жыртылған учаскелеріндегі гумусты горизонттардың биологиялық жай-күйіне көктемгі және күзгі кезеңдерде кешенді бағалау жүргізілді. Негізгі физиологиялық-трофикалық топтарға жататын микроорганизмдердің саны қоректік орталарда өсіру арқылы, ферментативтік белсенділік ФДА-тест көмегімен, ал құрылымдық-морфологиялық сипаттамалар Пфайффердің шеңберлік хроматография әдісімен анықталды. Зерттеу нәтижесінде биологиялық көрсеткіштердің айқын маусымдық және топырақ типіне байланысты өзгергіштігі анықталды: микроорганизмдердің жалпы саны $126{,}0\times10^6$-дан $21{,}83\times10^6$ КТБ/г топыраққа дейін төмендеді. Актиномицеттер мен минералдық азот қосылыстарын пайдаланатын бактериялардың ең жоғары саны тиісінше 180,0 және $174{,}67\times10^5$ КТБ/г топырақты құрады. ФДА-белсенділіктің ең жоғары мәні 3 сағат ішінде 40,5 мкг флуоресцеин/г топырақты құрады. Шеңберлік хроматография нәтижелері бойынша күзгі кезеңде CR көрсеткіші 21–27, OZ – 38–49, TR – 96–110 аралығында өзгерді, ал концентрлік сипаттамалар салыстырмалы тұрақтылық танытып, 5–6 сақинамен сипатталды. Тың топырақтар микроорганизмдердің жоғары биологиялық белсенділігімен сипатталды, ал жыртылған учаскелерде жерді пайдалану сипатына байланысты микробиологиялық көрсеткіштердің өзгеруі байқалды. Алынған нәтижелер топырақтардың биологиялық жай-күйін бағалау, олардың құнарлылығын сақтау және ұтымды пайдалану шараларын негіздеу кезінде микробиологиялық, физикалық және химиялық көрсеткіштерді кешенді түрде ескерудің маңыздылығын айқындайды.

Түйінді сөздер: топырақ, микробтық қауымдастықтар, ферментативтік белсенділік, бактериялар, дөңгелек хроматография, топырақ құнарлылығы.

РЕЗЮМЕ

Р. Аипова[1], А.А. Курманбаев[1]*, Ш.Г. Ермек[1], А.К. Аманбосын[1], С.И. Танирбергенов[1]

ОЦЕНКА БИОЛОГИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ И ПОКАЗАТЕЛЕЙ СОСТОЯНИЯ ЗДОРОВЬЯ ПОЧВ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ОБЛАСТИ ЖЕТІСУ

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

В работе проведена комплексная оценка биологического состояния гумусовых горизонтов лугово-серозёмных, предгорных светло-каштановых, каштановых и горных тёмно-каштановых почв Жетісуской области на целинных и пахотных участках в весенний и осенний периоды. Численность основных физиолого-трофических групп микроорганизмов определяли культуральными методами, ферментативную активность – с использованием ФДА-теста, структурно-морфологические характеристики – методом круговой хроматографии по Пфайфферу. Выявлена выраженная сезонная и почвенная вариабельность биологических показателей: общая численность микроорганизмов снизилась с $126{,}0\times10^6$ до $21{,}83\times10^6$ КОЕ/г почвы; максимальная численность актиномицетов и бактерий, использующих минеральные формы азота, составила 180,0 и $174{,}67\times10^5$ КОЕ/г почвы соответственно. ФДА-активность достигала 40,5 мкг флуоресцеина/г почвы за 3 ч. По данным круговой хроматографии осенью значения CR составляли 21–27, OZ – 38–49, TR – 96–

110 при относительной стабильности концентрических характеристик (5–6 колец). Целинные почвы характеризовались более высокой биологической активностью, тогда как на пахотных участках отмечались изменения показателей, связанные с характером землепользования. Полученные результаты свидетельствуют о необходимости комплексного учета физических, химических и биологических показателей при оценке состояния почв и разработке мероприятий по сохранению их плодородия.

Ключевые слова: почва, микробные сообщества, ферментативная активность, бактерии, круговая хроматография, плодородие.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

1. Aipova Rakhilya – Leading Research Scientist, Department of Soil Fertility and Biology, PhD, https://orcid.org/0000-0001-8318-6776, e-mail: rakhilya_73@mail.ru

2. Kurmanbayev Askar Abylaikanovich – Chief Research Scientist, Department of Soil Fertility and Biology, Doctor of Biological Sciences, Professor, https://orcid.org/0000-0003-4384-7634, e-mail: wberel@gmail.com

3. Yermek Shugyla Galymzhankyzy – Microbiology Engineer, Department of Soil Fertility and Biology, https://orcid.org/0009-0004-0178-6030,
e-mail: shugyla.yermek@mail.ru

4. Amanbossyn Alina Kuanyshkyzy – Microbiology Engineer, Department of Soil Fertility and Biology, https://orcid.org/0009-0005-2464-2264,
e-mail: aamanbossyn@gmail.com

5. Tanirbergenov Samat Isembayevich – Deputy Chairman of the Management Board for Science, https://orcid.org/0000-0002-6403-0984, e-mail: tanir_sem@mail.ru

ЭКОЛОГИЯ ПОЧВ

ҒТАМР: 68.05.41
DOI: 10.51886/1999-740X_2026_4_32

Д.А. Досманбетов[1], А.Б. Ибраева[2], Е.М. Каспакбаев[1]*, Р.С. Ахметов[1], Ж.С. Дукенов[1], Н.С. Келгенбаев[3], Ж.К. Ракымбеков[1], С.У. Косанов[4], М.А. Уашев[1]

АРАЛ ТЕҢІЗІНІҢ ҚҰРҒАҒАН ТАБАНЫНДАҒЫ ТӘЖІРИБЕЛІК УЧАСКЕЛЕРДЕГІ ТОПЫРАҚ ЫЛҒАЛДЫЛЫҒЫНЫҢ ДИНАМИКАСЫ

[1]«Ә.Н. Бөкейхан атындағы Қазақ орман шаруашылығы және агроорманмелиорация ғылыми-зерттеу институты» ЖШС Алматы филиалы, 050050, Алматы, Жарсуат көшесі, 17а, Қазақстан

**e-mail: kaspakbaeverganat1971@yandex.ru*

[2]«Қазақ ұлттық аграрлық зерттеу университеті» КЕАҚ, 050010, Алматы, Абай даңғылы, 8, Қазақстан

[3]«Ә.Н. Бөкейхан атындағы Қазақ орман шаруашылығы және агроорманмелиорация ғылыми-зерттеу институты» ЖШС Батыс Қазақстан филиалы, 030006, Алматы, Жургенев көшесі, 169, Қазақстан

[4]«Ә.Н. Бөкейхан атындағы Қазақ орман шаруашылығы және агроорманмелиорация ғылыми-зерттеу институты» ЖШС Қызылорда филиалы, 120000, Алматы, Абай даңғылы, 37/4, Қазақстан

Аңдатпа. Құрғақ климат пен табиғи ландшафттардың өзгеруі жағдайында Арал теңізінің құрғаған ұлтанындағы топырақтың су режимін зерттеу ерекше өзекті мәселе, мұнда ылғалдың жетіспеушілігі тұрақты орман екпелерін қалыптастыруда негізгі шектеуші факторларының бірі болып табылады. Топырақтағы ылғал топырақтың түзілу процестерінің бағытын, өсімдіктердің өсуі мен даму жағдайларын, сонымен қатар су құрғағаннан кейінгі (постаквалды) аумақтардағы орман мелиорациялық іс-шаралардың тиімділігін анықтайды. Орман өсіруге жарамдылық дәрежесіне қарай Арал теңізінің құрғаған табанының топырақтары үш топқа бөлінеді: қолайлы - құмды және құмайт шөгінділерде қалыптасқан; қанағаттанарлық - эолдық құм жамылғысымен жабылған түптік шөгінділерде қалыптасқан; шартты түрде жарамды - тұздану деңгейі жоғары және су-физикалық қасиеттері қолайлылығы төмен ауыр саздақты және сазды түптік шөгінділерде қалыптасқан топырақтар. Зерттеудің мақсаты орман өсіруге жарамдылығы әртүрлі топтарға жататын Арал теңізінің құрғаған ұлтанындағы тәжірибелік учаскелерде профилі бойынша 1,0 м тереңдікке дейінгі топырақ ылғалдылығының маусымдық динамикасын зерттеу болды. Жұмыстың міндеттеріне көктемгі, жазғы және күзгі кезеңдерде 10 сантиметрлік топырақ қабаттары бойынша ылғалдың таралуын, ылғалдылықтың тік және маусымдық өзгергіштігінің ерекшеліктерін анықтау, сонымен қатар топырақтың су режиміне салыстырмалы талдау жүргізу қарастырылды. Зерттеулер 2026 жылы SM-150t топырақ температурасы мен көлемді ылғалдылығын анықтайтын датчиктің көмегімен жүргізілді. Өлшеулер тереңдігі 1,0 м дейінгі топырақ кескіндерінде үш рет қайталанды, ол алынған деректердің репрезентативтілігін қамтамасыз етті. Ылғалдылықтың максималды мәні көктемде (орта есеппен 61,4%) белгіленді, ал ылғалдың негізгі шоғырлануы еріген судың инфильтрациясына байланысты 30-100 см қабаттарда жүреді. Жазда топырақ ылғалдылығының төмендеуі (51,5% дейін), әсіресе жоғарғы қабаттарда (0-30 см) байқалады, бұл булану процестерінің жоғарылауымен байланысты болып отыр. Күзде ылғалдылықтың орташа жылдық мәні ең төменгі көрсеткіштерге жетті (47,1%), бұл жазғы тапшылықтан кейін ылғал қорының толық қалпына келмеуін көрсетеді. Алынған нәтижелер Арал теңізінің құрғаған ұлтанындағы топырақтың су режимін қалыптастыру туралы түсініктерді кеңейтеді және орман мелиорациялық іс-шараларды негіздеу, ағаш және бұта түрлерін таңдау кезінде, сонымен қатар құрғақшылық жағдайында топырақ-гидрологиялық процестердің мониторингі бағдарламаларын әзірлеу кезінде пайдаланылуға мүмкіндік береді.

Түйінді сөздер: топырақ ылғалдылығы, Арал теңізінің құрғаған ұлтаны, маусымдық динамика, орман өсіруге жарамдылық, су режимі, топырақ-гидрологиялық жағдайлары.

КІРІСПЕ

Топырақ ылғалдылығы гидрологиялық циклдің негізгі құрамдас бөлігі болып табылады және биогеохимиялық процестерге, өсімдіктердің өсуіне, жер асты суының динамикасына және экожүйелердің қалыптасуына түбегейлі әсер етеді [1, 2]. Арал теңізінің құрғаған ұлтанының аймағын қамтитын аридті және жартылай аридті климат жағдайында топырақ ылғалдылығының динамикасы екпе ормандар өсіруде және су үнемдеу технологияларының тұрақты дамуы үшін ерекше маңызды болады [3, 4].

XX ғасырда Арал теңізі, ең алдымен, ауыл шаруашылығы жерлерін суару кезінде Амудария мен Сырдария өзендерінің су ресурстарын антропогендік қайта бағыттау әсерінен туындаған күрт өзгерістерге ұшырады. Нәтижесінде су бетінің айтарлықтай төмендеуі байқалды, нәтижесінде топырақ су режимінің, жер асты суы деңгейінің, тұз режимінің және топырақ профилінің құрылымының терең өзгерістері бар су құрғағаннан кейінгі (постаквалды) ландшафттар пайда болды. Осы аумақтарда орман мелиорациялық іс-шараларды өткізу бірқатар гидрологиялық және экологиялық сын-қатерлермен ұштасып отыр.

Топырақ ылғалдылығы өсімдіктердің физиологиялық жағдайына, фотосинтез жылдамдығына, тамыр жүйесінің дамуына, сонымен қатар органикалық заттардың минералдануы мен ыдырау процестеріне тікелей әсер етеді [5, 6]. Ылғалдың жетіспеушілігі екпелердің өнімділігінің төмендеуіне, өсімдіктердің стресстік жағдайларының жоғарылауына және төтенше жағдайларға төзімділігінің төмендеуіне алып келеді [7]. Сондықтан топырақтағы ылғалдың таралуының маусымдық және тік ерекшеліктерін зерттеу орман мелиорациясы мен топырақтану саласындағы ғылыми зерттеулердің маңызды құрамдас бөлігі болып табылады.

Топырақтың ылғалдылығы айтарлықтай кеңістіктік және уақыттық вариацияларды көрсетеді және ғаламшардағы судың жалпы көлемінің аз ғана бөлігін құраса да, гидрологиялық циклдің негізгі факторларының бірі болып табылады. Топырақ құрлықтағы гидрологиялық циклде негізгі рөл атқарады, жауын-шашынның булану, жер үсті ағыны және терең инфильтрация арасындағы таралуын айтарлықтай анықтайды. Топырақ ылғалдылығы динамикасының тікелей немесе жанама әсері метеорологиялық процестерге, өсімдіктердің өсуіне, топырақ биогеохимиясына, жер асты суының динамикасына және «топырақ–өсімдік–атмосфера» жүйесіндегі қоректік заттар мен ластаушы заттардың алмасуына әсер етеді [8, 9].

Топырақ ылғалдылығының динамикасы өте күрделі процесс болып табылады:

1. физикалық, химиялық және биологиялық процестердің өзара әрекеттесуі;
2. жауын-шашынның біркелкі болмауы, атмосфералық турбуленттілік, радиациялық режим, топырақтың гетерогенді құрылымы мен жер бедері, өсімдік жамылғысы, тамыр жүйесі мен органикалық заттардың болуы сияқты көптеген ауыспалы факторлар;
3. кеңістіктік және уақыттық масштабтардың кең ауқымы [9].

Дегенмен, топырақ ылғалдылығы динамикасының маусымдық өзгергіштігін түсіну су тасқынын болжауға, егіншілік жағдайында ауыл шаруашылығы өндірісінің оңтайлы уақытын анықтауға және топырақ ылғалдылығы мен климаттық динамика арасындағы ықтимал кері байланысты бағалауға мүмкіндік береді [10].

Әр түрлі аймақтарда жүргізілген бірқатар зерттеулер топырақтың физикалық қасиеттерінің жерді пайдалануға және өсімдік жамылғысына айтарлықтай әсер ететіндігін көрсетеді [11].

Топырақтың физикалық сипаттамалары (мысалы, көлемдік тығыздығы, тығыздалу дәрежесі, топырақ агрегаттарының кеуектілігі және тұрақтылығы) топырақтағы судың қозғалысын бақылайды, сондықтан ормандарды кесу мен жерді пайдаланудың өзгеруін бағалау кезінде сезімтал параметрлер болып табылады.

Ылғалдың жетіспеушілігі және оның өсімдіктерге жеткіліксіз болуы фотосинтез қарқындылығын күрт төмендетеді [12]. Топырақтағы ылғалдың жетіспеушілігі жауын-шашын жеткіліксіз болған кезде, сонымен қатар жер асты суларының деңгейі төмендеген кезде пайда болуы мүмкін. Топырақта және сәйкесінше өсімдікте ылғалдың болмауы бірқатар ауруларды тудыруы мүмкін: жапырақтардың кебуі, өсімдіктердің құрап қалуы, ағаштардың өлуі, өсімдіктердің аласа өсуі [13].

Жылдан жылға тұқым өнімінің ауытқуы көбінесе топырақтағы ылғал қорының өсімдіктердің қажеттіліктеріне сәйкес келмеуінен туындайды.

Су топырақтың түзілуінде басты рөл атқарады: минералдардың шайылуы және жаңадан түзілу процестері, гумустың пайда болуы және химиялық реакциялар тек сулы ортада жүреді; топырақ профилінің генетикалық қабаттарының қалыптасуы, топырақта жүретін процестердің динамикасы сумен байланысты. Топырақтағы су терморегуляциялық фактор ретінде де әрекет етеді, топырақтың жылу балансын және оның температуралық режимін анықтайды. Оның топырақ құнарлылығындағы рөлі ерекше [12].

МАТЕРИАЛДАР МЕН ӘДІСТЕР

Зерттеу объектісі орман өсіруге жарамдылығы бойынша үш топпен ұсынылған Арал теңізінің құрғатылған түбінің топырақтары болып табылады: орман өсіру үшін қолайлы жағдайлармен сипатталатын шөлді құмды және құмды сазды топырақтар; эолды құмды жамылғысы бар теңіз жағалауындағы әлсіз және орташа тұзды топырақтар; сондай-ақ санатқа жататын сортаңды құмды сазды және сазды топырақтар шартты түрде орманға жарамды жерлер.

Топырақ ылғалдылығын анықтауда ғалымдар әр түрлі әдістерді қолданады [14-18]. Ал топырақтың ылғалдылығын анықтаудың негізгі әдісітерінің бірі – термостатты-салмақтық [19]. Осы әдіске сәйкес, АМ-16 топырақ бұрғысымен әр 10 см сайын 50 немесе 100 см тереңдікке дейін топырақ сынамаларын алады. Бұрғы шыныаяғының төменгі бөлігінен топырақты алюминийден жасалған кептіргіш шыныаяқтарға ауыстырып, қақпақтармен жабылады. Сынамаларды алғаннан кейін топырақ салынған шыныаяқтарды станцияға жеткізеді және 0,1 г дәлдікпен өлшенеді. Әр шыныаяқтың нөмірі болады, ал бос шыныаяқтың салмағы арнайы журналға жазылады.

Шыныаяқтарды өлшегеннен кейін қақпағын ашып, термостатқа қойылады және топырақ сынамасы 100-105°С температурада шыныаяқтардың массасы дәйекті өлшеу кезінде 0,1 г-нан аспайтын уақытқа дейін кептіріледі. Әдетте құмдауыт топырақты кептіру ұзақтығы 6-7 сағат, саздауыт топырақты 7-8 сағат. Өлшеу нәтижелері жазылады.

Сипатталып отырған топырақ ылғалдылығын анықтау әдісі өте көп еңбекті қажет етеді, сондықтан радиоактивті изотоптарды қолдануға, топырақтың электр өткізгіштігін өлшеуге, топырақ ылғалының капиллярлық керілуіне және т.б. негізделген әртүрлі жанама әдістер әзірленеді.

Зерттеу нысаны – топырақтың ылғалдылығын өлшейтін аспап. Зерттеу мәні ылғалдылықты өлшеудің жанама әдістері болып табылады, олардың негізінде ылғал өлшегіштер жұмыс істейді [20].

Ылғал өлшегіш – бұл қатты заттың массасының пайыздық қатынасында абсолютті ылғалдылықты анықтау

үшін қолданылатын электронды құрылғы [21].

Біз топырақтың ылғалдылығын анықтауда топырақ-гидрологиялық зерттеулерде кеңінен қолданылатын жоғары сезімтал SM-150T көлемді ылғалдылық датчигінің көмегімен жүзеге асырдық. Бұл құрылғыны пайдалану арқылы топырақ профилінің құрылымын бұзбай, далалық жағдайда ылғалдылықты жедел өлшеуге болады.

Әр учаскеде тереңдігі 1,0 м-ге дейін топырақ кескіндері салынды. Өлшеулер әр кескіннің үш қабырғасынан үш рет қайталанып жүргізілді, бұл алынған мәліметтердің репрезентативтілігін қамтамасыз етті және топырақтың тік және көлденең бағытта біртекті өзгеру әсерін азайтты.

Топырақтың ылғалдылығы топырақ бетінен 100 см тереңдікке дейінгі қалыңдығы 10 см қабаттармен анықталды. Өлшеу көктемгі, жазғы және күзгі кезеңдерде жүргізілді, бұл топырақтың су режимінің жылдық циклінің негізгі кезеңдерін сипаттауға мүмкіндік берді. Алынған мәліметтер сипаттамалық статистика әдістерін қолдана отырып өңделді, әр қабат пен учаске үшін орташа ылғалдылық мәндері есептелді.

Бұл ғылыми-зерттеу жұмыстарының негізгі мақсаты – 2026 жыл ішінде орман өсіруге жарамдылығы бойынша әртүрлі топтарға жататын Арал теңізінің құрғаған ұлтанының тәжірибелік учаскелерінде профилі бойынша 1,0 м тереңдікке дейінгі топырақ ылғалдылығының маусымдық динамикасын зерделеу. Зерттеудің міндеттеріне мыналар: жылдың әр мезгілінде 10 сантиметрлік қабаттар бойынша топырақ ылғалдылығын анықтау, топырақ профилі бойынша ылғалдың таралу ерекшеліктерін анықтау, орман өсіруге жарамдылығы әртүрлі топтары бар жерлерде топырақ ылғалдылығына салыстырмалы талдау жүргізу, топырақтың су режиміне маусымдық факторлардың әсерін бағалау қарастырылды.

НӘТИЖЕЛЕР ЖӘНЕ ОЛАРДЫ ТАЛҚЫЛАУ

Топырақтың ылғалдылығы – топырақтың су режимін, топырақ түзілу процестерінің қарқындылығын және өсімдіктердің өсу жағдайларын анықтайтын маңызды көрсеткіш болып табылады. Орман экожүйелері үшін топырақтың ылғалдылығы шешуші рөл атқарады, өйткені ол көбінесе ағаш түрлерінің өсуі мен дамуын, тамыр жүйелерінің қалыптасуын, сондай-ақ екпелердің қолайсыз табиғи факторларға төзімділігін бақылайды.

Орташа жылдық ауа температурасы шамамен +14...+15°C құрайды. Жазғы кезең шілдеде +35...+38°C-қа жететін жоғары температурамен сипатталады, бұл топырақтың жоғарғы қабаттарынан ылғалдың қарқынды буланууына ықпал етеді. Қысқы кезең суық, минималды температурасы -20°C дейін, жауын-шашын мөлшері вегетациялық кезең басталғанға дейін топырақты айтарлықтай ылғалдандыру үшін жеткіліксіз.

Өңірде жауын–шашынның орташа жылдық мөлшері 150-200 мм-ден аспайды, бұл ретте олардың ең көп мөлшері көктем кезеңінде (сәуір-мамыр) түседі, ал жазда және күзде жауын-шашынның айқын тапшылығы байқалады. Жауын-шашынның мұндай біркелкі болмауы топырақтың ылғалдылығының жоғары маусымдық контрастын, әсіресе жоғарғы қабаттарда құрайды және өсімдіктердің топырақтың терең қабаттарына тәуелділігін арттырады.

Ауаның салыстырмалы ылғалдылығы жазда 25%-дан қыста 65%-ға дейін өзгереді, бұл топырақтан ылғалдың буланууына тікелей әсер етеді. Құрғақ және желді кезеңдер басым: жылдамдығы 6-8 м/с асатын солтүстік-батыс желдері басым, бұл топырақтың жел эрозиясының жоғарылауына және жер бетінен ылғалдың қосымша жоғалуына ықпал етеді.

Жаз айларында күн радиациясының жоғары деңгейі (650-700 ккал/см^2 дейін) өсімдіктердің булануы мен транспирациясын күшейтеді, бұл топырақтың су балансына тікелей әсер етеді және жоғарғы қабаттардағы ылғалдылықтың төмендеуін жылдамдатады. Маусымдық климаттық көрсеткіштер төменде 1-кестеде келтірілген.

Кесте 1 – Арал теңізінің құрғатылған түбінің тәжірибелік учаскелеріндегі маусымдық климаттық көрсеткіштер

Көрсеткіш	Көктем	Жаз	Күз	Қыс
Орташа температура, °С	+12…+18	+28…+38	+10…+20	-5…-20—5…-20
Максималды температура, °С	+22…+28	+35…+38	+22…+28	-5…-10
Минималды температура, °С	+3…+8	+18…+22	0…+5	-15…-20
Жауын-шашын мөлшері, мм	50-70	10-20	30-40	20-30
Салыстырмалы ылғалдылық, %	40-55	25-35	30-45	50-65
Желдің орташа жылдамдығы, м/с	4-6	6-8	4-6	3-5
Күн радиациясы, ккал/см^2	400-500	650-700	450-550	200-300

Арал теңізінің құрғаған ұлтанының ауа-райы жағдайлары топырақтың өте құрғақ су режимін құрайды, ол мыналармен сипатталады: жазда ылғалдың жетіспеушілігі; жауын-шашынның төмен деңгейі және олардың маусымдар бойынша жоғары өзгергіштігі; қарқынды булану және транспирация, әсіресе жоғарғы қабаттарда; жел эрозиясы және топырақ бетінен ылғалдың қосымша жоғалуы.

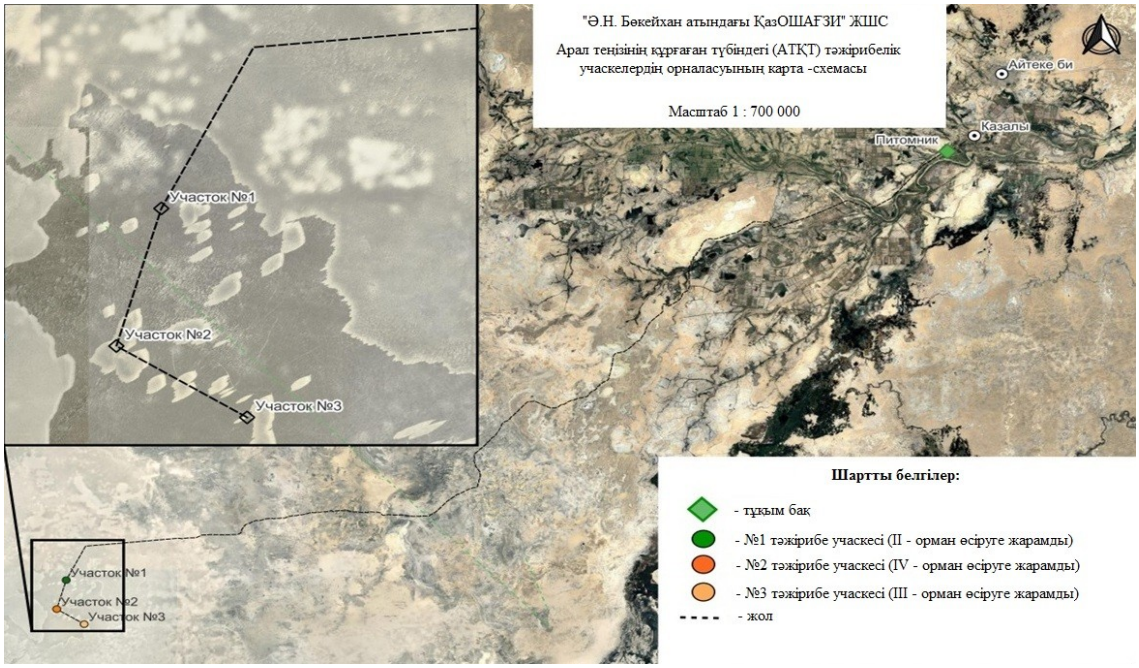
Бұл факторларды орман мелиорациялық іс-шараларды жобалау, тұрақты екпелерді өсіру үшін ағаш және бұта түрлерін таңдау, сонымен қатар құрғақ климат жағдайында топырақ-гидрологиялық процестерді бақылау бағдарламаларын жоспарлау кезінде ескеру қажет.

Орман өсіруге жарамдылығы әртүрлі топтары бар учаскелердегі топырақтың ылғалдылығын талдау ерекше қызығушылық тудырады, өйткені бұл тұрақты екпе ормандарын қалыптастыру кезінде ерекше әсер ететін фактор болып есептеледі. Арал теңізінің құрғаған ұлтанындағы тәжірибелік учаскелердің топырақ-гидрологиялық жағдайларының әртүрлі болуымен сипатталады, бұл ылғалдың жыл мезгілдеріне де, топырақ профилінің тереңдігіне де таралуын егжей-тегжейлі зерттеуді қажет етеді.

Зерттеулер 2026 жылы бір табиғи-климаттық аймақ шегінде орналасқан Арал теңізінің құрғаған ұлтанындағы тәжірибелік учаскелерде жүргізілді. Таңдалған учаскелер орман өсіруге жарамдылық тобы мен топырақ-гидрологиялық жағдайлары бойынша ерекшеленеді, бұл топырақтың су режимін салыстырмалы талдауға мүмкіндік берді.

Зерттеуге үш тәжірибелік учаске енгізілді: №1 учаске – орман өсіруге жарамдылығы бойынша 2-топ; №2 учаске – орман өсіруге жарамдылығы бойынша 4-топ; №3 учаске – орман өсіруге жарамдылығы бойынша 3-топ (сурет 1).

Топырақ ылғалдылығының маусымдық динамикасын зерттеу су режимінің ағымдағы жағдайын бағалауға ғана емес, сонымен қатар орман екпелерінің өнімділігін болжау, орман шаруашылығы іс-шараларын жоспарлау және аумақтардың орман жарамдылығын арттыру жөніндегі шараларды негіздеу кезінде алынған деректерді пайдалануға мүмкіндік береді.



Сурет 1 – Арал теңізінің құрғаған ұлтанында тәжірибелік учаскелердің орналасуы

Арал теңізінің құрғаған ұлтанының тәжірибелік учаскелеріндегі топырақ ылғалдылығын зерттеу нәтижелері 2-кестеде және 2-суретте көрсетілген. Деректерді талдау арқылы топырақ ылғалдылығының жылдың маусымына байланысты профиль бойынша тік бағытта да және уақыт бойынша да өзгеретінін көрсетті.

2-кестеде үш маусымда (көктем, жаз, күз) топырағы орман өсіруге жарамдылығы бойынша әртүрлі топтарда (2, 4 және 3) орналасқан үш учаскедегі топырақтың ылғалдылығы (%) туралы мәліметтер келтірілген. Өлшеу топырақтың қабаттары бойынша 1 метр тереңдікке дейін 10 см қадаммен жүргізілді. Сондай-ақ әр маусым үшін жер асты суының орташа деңгейі көрсетілген.

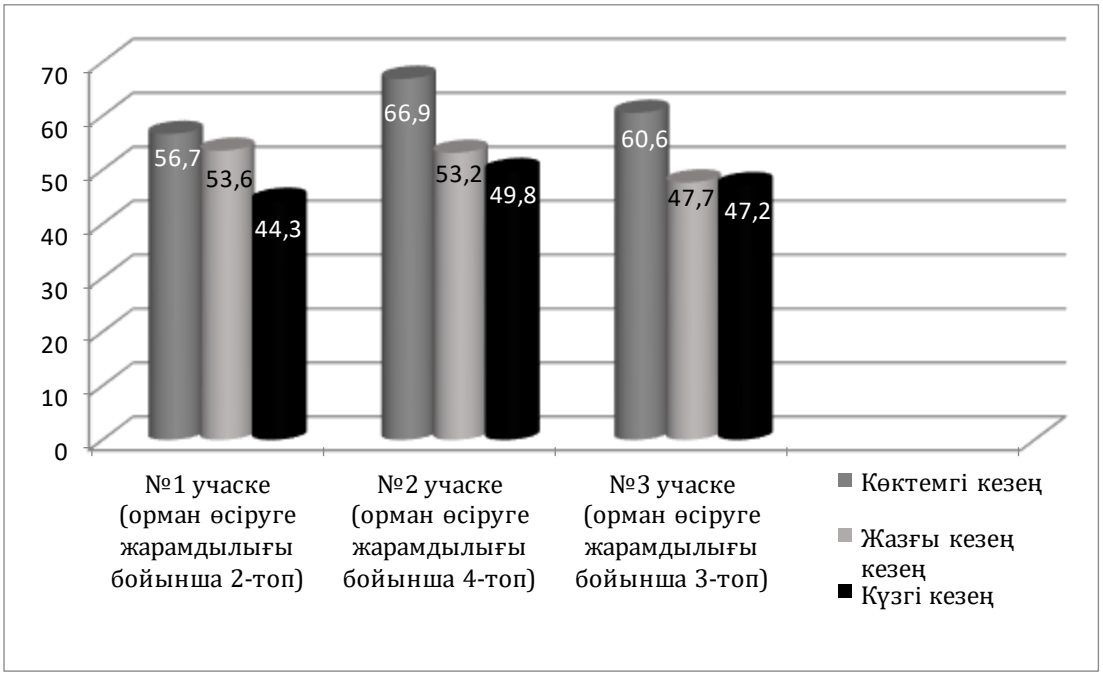
Көктемде топырақ ылғалдылығының бір жылдағы максималды мәндері белгіленді. Барлық учаскелер бойынша орташа ылғалдылық 61,4% құрады. Ылғалдың ең үлкен жинақталуы 30-100 см қабаттарда байқалды, онда ылғалдылық мәндері 65%-дан асады. Бұл еріген судың қарқынды сіңуіне және олардың топырақтың төменгі қабаттарына өтуіне байланысты.

Жоғарғы қабаттар (0-20 см) төмен ылғалдылық мәндерімен сипатталды, бұл булану процестерінің басталуымен және беткі қабаттардағы ылғалдың біркелкі таралмауымен түсіндіріледі. № 2-учаске басқа учаскелермен салыстырғанда ылғалдылықтың жоғары деңгейімен ерекшеленді, бұл сумен қамтамасыз етілуінің қолайлы жағдайларын көрсетеді.

Жазда топырақ ылғалдылығының айтарлықтай төмендеуі байқалды. Орташа мәні 51,5% құрады, бұл ауа температурасының жоғарылауымен және булану процестерінің жоғарылауымен байланысты. Ылғалдылықтың ең айқын төмендеуі 0-30 см қабаттарда тіркелді, мұнда ылғалдылық көктемгі мәндермен салыстырғанда 15-20% төмендеді. Топырақтың ылғалдылығын өлшеу процесі 3-суретте көрсетілген.

Кесте 2 – Арал теңізінің құрғаған ұлтанында орман өсіруге жарамдылығының әртүрлі топтарында орналасқан тәжірибелік учаскелердегі вегетациялық кезеңде топырақтың ылғалдылығы

№	Үлгіні алу кезеңі	Топырақ қабаты, см	Топырақтың ылғалдылығы, %			Орташа, %
			№1 учаске (орман өсіруге жарамдылығы бойынша 2-топ)	№2 учаске (орман өсіруге жарамдылығы бойынша 4-топ)	№3 учаске (орман өсіруге жарамдылығы бойынша 3-топ)	
1	2	3	4	5	6	7
1	Көктем	0-10	14,2	37,0	16,3	22,5
		10-20	35,5	72,0	37,8	48,4
		20-30	26,1	69,9	60,4	52,1
		30-40	72,2	75,5	63,4	70,4
		40-50	73,7	72,7	50,6	65,7
		50-60	70,3	74,1	73,0	72,5
		60-70	72,7	68,0	76,9	72,5
		70-80	69,4	66,3	75,2	70,3
		80-90	67,6	65,6	74,7	69,3
		90-100	65,3	68,0	77,7	70,3
Орташа			56,7	66,9	60,6	61,4
2	Жаз	0-10	12,6	18,5	11,3	14,1
		10-20	33,6	45,6	25,6	34,9
		20-30	31,1	56,3	45,8	44,4
		30-40	62,3	56,9	45,7	55,0
		40-50	64,1	75,2	65,3	68,2
		50-60	67,9	75,4	65,8	69,7
		60-70	51,2	53,3	58,6	54,4
		70-80	69,9	51,2	54,2	58,4
		80-90	71,1	49,7	53,2	58,0
		90-100	71,9	49,5	51,3	57,6
Орташа			53,6	53,2	47,7	51,5
3	Күз	0-10	9,1	12,2	11,3	10,9
		10-20	15,6	28,8	21,2	21,9
		20-30	38,9	41,2	29,6	36,6
		30-40	38,5	47,5	41,3	42,4
		40-50	56,2	63,2	60,8	60,1
		50-60	53,8	51,8	52,1	52,6
		60-70	59,2	59,6	67,8	62,2
		70-80	51,2	65,3	63,9	60,1
		80-90	59,3	65,9	55,2	60,1
		90-100	61,2	62,3	69,1	64,2
Орташа			44,3	49,8	47,2	47,1



Сурет 2 – Арал теңізінің құрғаған ұлтанында орман өсіруге жарамдылығының әртүрлі топтарында орналасқан тәжірибелік учаскелердегі топырақ ылғалдылығының маусымдық өзгеруі



а б

Сурет 3 – Арал теңізінің құрғаған ұлтанындағы тәжірибелік учаскелерінде топырақтың ылғалдылығын зерттеу процесі (а – топырақ кескінінің көрінісі, б – бақылау жүргізу)

Топырақтың төменгі қабаттарында (60-100 см) ылғалдылық аз өзгерді, бұл терең қабаттардың тұрақты су режимін көрсетеді. Сонымен қатар, осы тұрақты су режимі ағаш өсімдіктері үшін өте маңызды, олардың тамыр жүйесі құрғақ кезеңдерде төменгі қабаттардағы ылғалды қолдана алады.

Күзгі кезең топырақ ылғалдылығының ең төменгі орташа жылдық мән-

дерімен сипатталады – 47,1%. Жауыншашынға қарамастан, олардың мөлшері жазғы ылғал тапшылығын қамтамасыз ету үшін жеткіліксіз болады. Топырақтың жоғарғы қабаттарында төмен ылғалдылық мәндері сақталды, ал төменгі қабаттарда су режимінің салыстырмалы тұрақтануы байқалды.

Ылғалдылық деңгейі бойынша учаскелер арасындағы айырмашылықтар күз мезгілінде де сақталды, бұл топырақ-гидрологиялық жағдайлардың және орман өсіруге жарамдылық тобының топырақ профиліндегі ылғалдың таралуына тұрақты әсерін растайды.

Алынған нәтижелер орманды алқаптардағы топырақтардың су режимін қалыптастыруда маусымдық климаттық факторлардың жетекші рөлін көрсететін басқа зерттеушілердің мәліметтеріне сәйкес келеді.

ҚОРЫТЫНДЫ

Жүргізілген зерттеулер нәтижесінде орман өсіруге жарамдылығының әртүрлі топтарына жататын Арал теңізінің құрғаған ұлтанындағы тәжірибелік учаскелерде топырақ ылғалдылығының маусымдық және профильді динамикасының заңдылықтары анықталды. Су құрғағаннан кейінгі (постаквалды) ландшафттардағы топырақтың су режимі жоғары маусымдық өзгешелігімен және топырақ профилі бойынша тұрақты тік дифференциациямен сипатталатыны көрсетілген.

Топырақ ылғалдылығының максималды мәндері көктемде, учаскелер бойынша орташа көрсеткіш 61,4%-ға жеткен кезде тіркелді. Ылғалдың ең үлкен жинақталуы (аккумуляциясы) 30-100 см қабаттарда байқалды, бұл еріген судың инфильтрациясымен және терең қабатта ылғал қорының қалыптасуымен байланысты. Барлық маусымдардағы беткі қабаттар (0-20 см) ылғалдылықтың өзгергіштігінің жоғарылауымен және булану шығындарының ең жоғары болуымен ерекшеленді.

Жазғы кезеңде топырақ ылғалдылығының айқын төмендеуі байқалды (орта есеппен 51,5% дейін), бұл 0-30 см қабаттарда анық көрінеді, бұл жоғары температура жағдайында булану мен транспирацияның жоғарылауына байланысты. Сонымен қатар, төменгі қабаттар су режимінің салыстырмалы тұрақтылығын сақтап қалды, яғни олардың құрғақ кезеңде ағаш өсімдіктерін сумен қамтамасыз етудегі шешуші рөлін растайды.

Күз мезгілі топырақ ылғалдылығының ең төменгі орташа жылдық мәндерімен (47,1%) сипатталды, бұл жазғы тапшылықтан кейін ылғал қорының толық қалпына келмеуін көрсетеді. Барлық маусымдардағы ылғалдылық деңгейі бойынша учаскелер арасындағы айырмашылықтардың сақталуы топырақ-гидрологиялық жағдайлар мен орман өсіруге жарамдылығы бойынша топтардағы топырақтың су режимін қалыптастыруға жетекші әсерін көрсетеді.

Орман өсіруге жарамдылығы бойынша 4-топтың учаскесі 2-ші және 3-ші топтардың учаскелерімен салыстырғанда неғұрлым қолайлы және тұрақты ылғал режимімен ерекшеленетіні анықталды, бұл орман мелиорациялық іс-шараларды жобалау және қорғаныш екпелерін өсіру үшін ағаш-бұта түрлерін таңдау кезінде ескерілуі керек.

Алынған нәтижелер Арал теңізінің құрғаған ұлтанындағы топырақтың су режимі туралы түсініктерді кеңейтеді және орман өсіруді оңтайландыру, екпелердің тұрақтылығын арттыру және құрғақ жағдайларда топырақ-гидрологиялық процестердің ұзақ мерзімді мониторингі үшін ғылыми негіз бола алады.

ҚАРЖЫЛАНДЫРУ

Бұл зерттеу жұмысы Қазақстан Республикасы Экология және табиғи ресурстар министрлігімен қаржыландырылды (ИРН BR35638504).

ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Brady N.C., Weil R.R. The Nature and Properties of Soils. - 14th ed. - Pearson, 2008. - P. 14–19.

2. Hillel D. Introduction to Environmental Soil Physics. - Academic Press, 1998. - P. 526–532.

3. Ouyang Z., Zheng H., Xiao Y. Soil water regime and arid land reclamation // Agriculture Ecosystems & Environment. - 2013. - P. 258–269.

4. Xue X., Zhou H., Jiang H. Hydrological processes in desert soils // Hydrology Journal. - 2018. - P. 367–379.

5. Lal R. Soil and Water Conservation for Productivity and Environmental Protection. - Springer, 2010. - P. 168–177.

6. Peng X., Yang Y., Gao H. Soil moisture variability and plant responses // Ecological Research. - 2019. - P. 214–226.

7. Zhang L., Dawes W.R., Walker G.R. Soil moisture dynamics under arid climate // Water Resources Research. - 2016. - P. 166–178.

8. Воронин А.Д. Агрофизика почв. - М.: Наука, 2018. - 352 с.

9. Добровольский В.В., Никитин Е.Д. Экология почв. - М.: Академический проект, 2020. - 432 с.

10. Ковда В.А. Основы учения о почвах. - М.: Наука, 2019. - 410 с.

11. Орлов Д.С. Химия почв. - М.: Изд-во МГУ, 2017. - 384 с.

12. Шеин Е.В. Физика почв. - М.: КДУ, 2021. - 288 с.

13. Герасимова М.И. Почвенно-гидрологические условия лесных экосистем // Почвоведение. - 2020. - №4. - С. 45–53.

14. Zhang X., Feng G., Sun X. Advanced technologies of soil moisture monitoring in precision agriculture: A Review // Journal of Agriculture and Food Research. - 2024. - Vol. 18. - Art. 101473.

15. Myeni L., Moeletsi M.E., Clulow A.D. Field calibration of DFM capacitance probes for continuous soil moisture monitoring // Water SA. - 2021. - Vol. 47, No. 1. - P. 88–96.

16. Xu N., Daccache A., Ahmadi A., Houtz D., Perez-Barquero F.P. Soil moisture estimation with microwave remote sensing: a systematic review and meta-analysis // International Journal of Digital Earth. - 2025. - Vol. 18, Iss. 1. - P. 1–27.

17. Бабаева Г. Р., Рагимов Р. М. Вопросы валидации результатов при наземно-бортовом спектральном определении влажности почвы // Почвы и окружающая среда. – 2023. – Т. 6. – № 1. – С. e202.

18. Шадских В.А., Кижаева В.Е., Пешкова В.О., Шушпанов И.А., Иванищева З.Ф., Смирнов Е.С. Перспективы использования влагомера для оперативного определения влажности почвы // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации. Энгельс. – 2019. – № 1 (33). – С. 12–25.

19. Иванов А.Л. Водный режим почв лесных территорий // Лесоведение. - 2019. - №6. - С. 12-19.

20. Берлинер, М. А. Измерения влажности / М. А. Берлинер. - изд. 2-е, перераб. и доп. - М.: Энергия, 1973. - 400 с.

21. Болотов А. Г. Измерение влажности почв методом частотной диэлькометрии // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2013. – № 12 (110). – С. 36–39.

REFERENCES

1. Brady N.C., Weil R.R. The Nature and Properties of Soils. - 14th ed. - Pearson, 2008. - P. 14–19.

2. Hillel D. Introduction to Environmental Soil Physics. - Academic Press, 1998. - P. 526–532.

3. Ouyang Z., Zheng H., Xiao Y. Soil water regime and arid land reclamation // Agriculture Ecosystems & Environment. - 2013. - P. 258–269.

4. Xue X., Zhou H., Jiang H. Hydrological processes in desert soils // Hydrology Journal. - 2018. - P. 367–379.

5. Lal R. Soil and Water Conservation for Productivity and Environmental Protection. - Springer, 2010. - P. 168–177.

6. Peng X., Yang Y., Gao H. Soil moisture variability and plant responses // Ecological Research. - 2019. - P. 214–226.

7. Zhang L., Dawes W.R., Walker G.R. Soil moisture dynamics under arid climate // Water Resources Research. - 2016. - P. 166–178.

8. Voronin A.D. Agrofizika pochv. - M.: Nauka, 2018. - 352 s.

9. Dobrovolskiy V.V., Nikitin E.D. Ekologiya pochv. - M.: Akademicheskiy proekt, 2020. - 432 s.

10. Kovda V.A. Osnovy ucheniya o pochvakh. - M.: Nauka, 2019. - 410 s.

11. Orlov D.S. Khimiya pochv. - M.: Izd-vo MGU, 2017. - 384 s.

12. Shein E.V. Fizika pochv. - M.: KDU, 2021. - 288 s.

13. Gerasimova M.I. Pochvenno-gidrologicheskie usloviya lesnykh ekosistem // Pochvovedenie. - 2020. - №4. - S. 45–53.

14. Zhang X., Feng G., Sun X. Advanced technologies of soil moisture monitoring in precision agriculture: A Review // Journal of Agriculture and Food Research. - 2024. - Vol. 18. - Art. 101473.

15. Myeni L., Moeletsi M.E., Clulow A.D. Field calibration of DFM capacitance probes for continuous soil moisture monitoring // Water SA. - 2021. - Vol. 47, No. 1. - P. 88-96.

16. Xu N., Daccache A., Ahmadi A., Houtz D., Perez-Barquero F.P. Soil moisture estimation with microwave remote sensing: a systematic review and meta-analysis // International Journal of Digital Earth. - 2025. - Vol. 18, Iss. 1. - P. 1-27.

17. Babaeva G.R., Ragimov R.M. Voprosy validatsii rezul'tatov pri nazemno-bortovom spektral'nom opredelenii vlazhnosti pochvy // Pochvy i okruzhayushchaya sreda. - 2023. - T. 6, No. 1. - e202.

18. Shadskikh V.A., Kizhaeva V.E., Peshkova V.O., Shushpanov I.A., Ivanishcheva Z.F., Smirnov E.S. Perspektivy ispol'zovaniya vlagomera dlya operativnogo opredeleniya vlazhnosti pochvy // Nauchnyi zhurnal Rossiiskogo NII problem melioratsii. - Engel's, 2019. - No. 1 (33). - S. 12–25.

19. Ivanov A.L. Vodnyy rezhim pochv lesnykh territoriy // Lesovedenie. - 2019. - №6. - S. 12-19.

20. Berliner M.A. Izmereniya vlazhnosti / M.A. Berliner. - izd. 2-e, pererab. i dop. - M.: Energiya, 1973. - 400 s.

21. Bolotov A. G. Izmerenie vlazhnosti pochv metodom chastotnoy dielkometrii // Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2013. – No. 12 (110). – P. 36–39.

РЕЗЮМЕ

Д.А. Досманбетов[1], А.Б. Ибраева[2], Е. М. Каспакбаев[1]*, Р.С. Ахметов[1],
Ж.С. Дукенов[1], Н.С. Келгенбаев[3], Ж.К. Ракымбеков[1], С.У. Косанов[4], М.А. Уашев[1]

ДИНАМИКА ВЛАЖНОСТИ ПОЧВ НА ОПЫТНЫХ УЧАСТКАХ ОСУШЕННОГО ДНА АРАЛЬСКОГО МОРЯ

[1]ТОО «Казахский научно-исследовательский институт лесного хозяйства и агролесомелиорации им. А.Н. Букейхана», Алматинский филиал, 050050, Алматы, ул. Жарсуат, 17а, Казахстан

[2]НАО «Казахский национальный аграрный исследовательский университет», 050010, Алматы, пр. Абая, 8, Казахстан

[3]ТОО «Казахский научно-исследовательский институт лесного хозяйства и агролесомелиорации имени А.Н. Букейхана», Западно-Казахстанского филиала 030006, Актобе, ул. Жургенова, 169, Казахстан

[4]ТОО «Казахский научно-исследовательский институт лесного хозяйства и агролесомелиорации имени А.Н. Букейхана», Кызылординский филиала, 120000, Кызылорда, пр. Абая 37/4, Казахстан,

**e-mail: kaspakbaeverganat1971@yandex.ru*

В условиях аридного климата и трансформации природных ландшафтов особую актуальность приобретает изучение водного режима почв осушенного дна Аральского моря, где дефицит влаги является одним из основных лимитирующих факторов формирования устойчивых лесных насаждений. Почвенная влага определяет направленность почвообразовательных процессов, условия роста и развития растительности, а также эффективность лесомелиоративных мероприятий на постаквальных территориях. По степени лесорастительной пригодности почвы осушённого дна Аральского моря подразделяются на три группы: благоприятные - сформированные на песчаных и супесчаных отложениях; удовлетворительные - на донных отложениях, перекрытых эоловым песчаным чехлом; условно лесопригодные - на тяжёлосуглинистых и глинистых донных отложениях, отличающихся повышенной засолённостью и менее благоприятными водно-физическими свойствами. Целью исследования явилось изучение сезонной динамики влажности почвы по профилю до глубины 1,0 м на опытных участках осушенного дна Аральского моря, относящихся к различным группам лесопригодности. В задачи работы входило определение распределения влаги по 10-сантиметровым слоям в весенний, летний и осенний периоды, выявление особенностей вертикальной и сезонной изменчивости влажности, а также проведение сравнительного анализа водного режима почв на участках с различными почвенно-гидрологическими условиями. Исследования проводились в 2026 году с использованием датчика объемной влажности SM-150T. Измерения выполнялись в почвенных разрезах глубиной до 1,0 м с трёхкратной повторностью, что обеспечило репрезентативность полученных данных. Максимальные значения влажности отмечены в весенний период (в среднем 61,4%), при этом основная аккумуляция влаги происходила в горизонтах 30–100 см за счёт инфильтрации талых вод. В летний период зафиксировано снижение влажности почвы (до 51,5%), наиболее выраженное в верхних слоях (0–30 см), что связано с усилением испарительных процессов. Осенью среднегодовые значения влажности достигали минимальных показателей (47,1%), что указывает на неполное восстановление влагозапасов после летнего дефицита. Полученные результаты расширяют представления о формировании водного режима почв осушенного дна Аральского моря и могут быть использованы при обосновании лесомелиоративных мероприятий, выборе древесных и кустарниковых пород, а также при разработке программ мониторинга почвенно-гидрологических процессов в аридных условиях.

*Ключевые слова: в*лажность почвы, осушенное дно Аральского моря, сезонная динамика, лесопригодность, водный режим, почвенно-гидрологические условия.

SUMMARY

D.A. Dosmanbetov[1], A.B. Ibraeva[2], Y.M. Kaspakbayev[1]*, R.S. Akhmetov[1], Zh.S. Dukenov[1], N.S. Kelgenbaev[3], Zh.K. Rakymbekov[1], S.U. Kosanov[4], M.A. Uashev[1]

SOIL MOISTURE DYNAMICS IN EXPERIMENTAL SITES OF THE DRIED ARAL SEA BEDS

[1]LLP "A.N. Bukeikhan Kazakh Research Institute of Forestry and Agroforestry Reclamation", 050050, Almaty, Branch, Zharsuat St., 17a, Kazakhstan

[2]NAO "Kazakh National Agrarian Research University", 050010, Almaty, Abay Ave., 8, Kazakhstan

[3]LLP "A.N. Bukeikhan Kazakh Research Institute of Forestry and Agroforestry Reclamation", West Kazakhstan Branch, 030006, Aktobe, Zhurgenov St.,169, Kazakhstan

[4]LLP "A.N. Bukeikhan Kazakh Research Institute of Forestry and Agroforestry Reclamation", Kyzylorda Branch, 120000, Kyzylorda, Abay Ave., 37/4, Kazakhstan,

**e-mail: kaspakbaeverganat1971@yandex.ru*

In the context of an arid climate and the transformation of natural landscapes, studying the soil moisture regime of the dried bed of the Aral Sea is particularly relevant. Moisture deficiency is one of the main limiting factors for the formation of sustainable forest stands. Soil moisture determines the direction of soil formation processes, the conditions for vegetation growth and development, and the effectiveness of forest reclamation measures in post-aquatic areas. Based on their suitability for afforestation, soils of the exposed Aral Sea bed are classified into three groups: suitable soils developed on sandy and sandy loam deposits; moderately suitable soils developed on bottom sediments overlain by an Aeolian sand mantle; and conditionally suitable soils developed on heavy loam and clayey bottom sediments characterized by elevated salinity and less favorable soil water and physical properties. The aim of the study was to investigate the seasonal dynamics of soil moisture along a profile to a depth of 1.0 m in experimental plots of the dried bed of the Aral Sea, belonging to different forest suitability groups. The objectives of the study included determining the distribution of moisture in 10-centimeter layers during the spring, summer, and fall periods, identifying the characteristics of vertical and seasonal moisture variability, and conducting a comparative analysis of the soil moisture regime in plots with different soil and hydrological conditions. The study was conducted in 2026 using an SM-150T volumetric moisture sensor. Measurements were taken in soil pits up to 1.0 m deep, repeated three times, ensuring the representativeness of the data obtained. Maximum moisture values were recorded in the spring (61.4% on average), with most moisture accumulation occurring in the 30-100 cm horizons due to meltwater infiltration. A decrease in soil moisture (to 51.5%) was recorded in the summer, most pronounced in the upper layers (0-30 cm), due to increased evaporation. In the fall, average annual moisture values reached their minimum (47.1%), indicating incomplete restoration of moisture reserves after the summer deficit. These results expand our understanding of the formation of the soil water regime in the dried bed of the Aral Sea and can be used to justify forest reclamation measures, select tree and shrub species, and develop programs for monitoring soil-hydrological processes in arid conditions.

Keywords soil moisture, dried bed of the Aral Sea, seasonal dynamics, forest suitability, water regime, soil-hydrological conditions.

АВТОРЛАР ТУРАЛЫ МӘЛІМЕТ

1. Досманбетов Данияр Ахметович – PhD, қауымдастырылған профессор «Ә.Н. Бөкейхан атындағы Қазақ орман шаруашылығы және агроорманмелиорация ғылыми-зерттеу институты» ЖШС Алматы филиалының жетекші ғылыми қызметкері, https://orcid.org/0000-0001-8695-5091, e-mail: daniyar_d.a.a@mail.ru

2. Ибраева Алия Болатбеккызы – биология ғылымының магистрі, https://orcid.org/0009-0004-6082-8245, эл. пошта: aliya-ibrayeva81@mail.ru

3. Каспакбаев Ерганат Муратович – ауыл шаруашылығы ғылымдарының магистрі, https://orcid.org/0009-0003-4479-5992,
e-mail: kaspakbaeverganat1971@yandex.ru

4. Ахметов Руслан Сабырович – орман ісі магистрі, https://orcid.org/0000-0003-3032-8157, e-mail: ars_28@mail.ru

5. Дукенов Жеңіс Серикович - ауыл шаруашылығы ғылымдарының магистрі, https://orcid.org/0000-0001-7423-8570, e-mail: 7078786694@mail.ru

6. Келгенбаев Нуржан Сержанұлы - ЖШС Батыс Қазақстан филиалының директоры, https://orcid.org/0000-0003-1848-806X, nurzhan_n_n@mail.ru

7. Ракымбеков Жандос Канатович – ауыл шаруашылығы ғылымдарының магистрі, аға ғылыми қызметкері, https://orcid.org/0000-0002-8404-5278,
e-mail: rakymbekov.zh@gmail.com

8. Косанов Самалбек Уразбаевич - ЖШС Қызылорда филиалының директоры, https://orcid.org/0000-0002-3877-7566, e-mail: samalbek_72@mail.ru

9. Уашев Мунарбек Алтынбекович - ЖШС Алматы филиалының кіші ғылыми қызметкері, https://orcid.org/0009-0005-4227-7264,
e-mail: Uashev.munarbek@mail.ru

ГРНТИ: 68.33.31; 68.05.29; 68.05.43

DOI: 10.51886/1999-740X_2026_4_46

А.Х. Наушабаев[1], С.С. Наушабаева[1], Н. Сейткали[1], Т.К. Василина[1], К.О. Караева[1]*, Н.П. Аубакиров[1]

ТРАНСФОРМАЦИЯ ИОННОГО КОМПЛЕКСА ДЕГРАДИРОВАННЫХ СОЛОНЦОВ ПАШНИ СЕМИАРИДНОЙ ЗОНЫ АКМОЛИНСКОЙ ОБЛАСТИ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ СЕРНЫХ МЕЛИОРАНТОВ: ЛАБОРАТОРНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

[1]Казахский национальный аграрный исследовательский университет,

*050010, Алматы, пр. Абая, 8, Казахстан, *e-mail: askhat.naushabayev@kaznaru.edu.kz*

*Аннотация***.** Мелкие солонцы семиаридной зоны Акмолинской области характеризуются повышенным содержанием обменного магния и натрия, сильнощелочной реакцией среды и структурной неустойчивостью. Несмотря на это они активно вовлекаются в неорошаемую пашню и подвержены антропогенной деградации. Для разработки стратегии их восстановления были проведены модельные лабораторные исследования, целью которых была оценка краткосрочного воздействия шести серных и серосодержащих мелиорантов на химические свойства мелких солонцов. Внесение серосодержащих мелиорантов в мелкие солонцы инициировало комплекс взаимосвязанных физико-химических процессов, затрагивающих как состав почвенного раствора, так и состояние почвенного поглощающего комплекса. Изменения носили системный характер, что подтверждается как однофакторным анализом, так и результатами PCA и корреляционного анализа. Наиболее чувствительным показателем оказалась реакция почвы, которая во всех вариантах сместилась в сторону снижения. При этом степень подкисления различалась между вариантами опыта. Среди мелиорантов применение жидкой серы способствовало максимальному снижению pH от 8,73 до 7,75 в сравнении с контрольным вариантом. Наиболее удаленными от контрольного варианта явились варианты с жидкой серой и серной кислотой, которые демонстрировали максимальные сдвиги как по растворимым ионам, так и по показателям обменного комплекса. Эти мелиоранты в течении 30-дневной инкубации воздействовали не на отдельные параметры, а на всю химическую систему мелких солонцов. По данным многомерного анализа (PCA) установлено, что в зависимости от интенсивности влияния серосодержащих мелиорантов на мелкие солонцы, они образуют отдельные кластеры. Корреляционный анализ выявил выраженные антагонистические связи между долей обменного натрия и кальция, подтверждая ключевую роль процессов Ca–Na-обмена в трансформации солонцовой почвы. Таким образом, результаты исследований позволили выявить наиболее эффективные серосодержащие мелиоранты, которые за короткий срок изменили химический состав почвенного раствора и поглощающего комплекса мелких солонцов.

Ключевые слова: автоморфные мелкие солонцы, семиаридная зона, Акмолинская область, деградация, мелиорация, серные и серосодержащие мелиоранты.

ВВЕДЕНИЕ

В силу своих физико-географических особенностей более 80% засоленных почв СНГ сосредоточено на территории Республики Казахстан. Их площадь составляет 111,5 млн. га или 41% территории республики [1]. Если в южных, юго-западных и юго-восточных районах республики преобладают солончаки и солончаковые почвы, то в северных и центральных районах - солонцы и солонцеватые почвы (74,077 млн. га) [2]. Последние сформировались в виде пятнистых комплексов среди наиболее плодородных черноземов и каштановых почв зернового пояса северных областей (Акмолинская, Павлодарская, Костанайская) Республики. Эти почвы обладают неблагоприятными химическими и водно-физическими свойствами, связанными с повышенным содержанием поглощенного нат-

рия и магния, а также токсичным содержанием натриевых соединений в растворе [3]. Среди последних часто встречаются гидрокарбонаты и карбонаты натрия, которые являются самыми вредными для растений. Их токсичность в 3 и 10 раза выше чем у токсичного сернокислого натрия. Токсичная сода, поступая в растительный организм, отравляет его, нарушает нормальное течение физиологических процессов, снижает энергию фотосинтеза и, следовательно, продуктивность растений [4]. В подзоне темно-каштановых почв на мелких и средних участках сильнощелочных смешанно содово-хлоридно-сульфатных мелких магниево-глубоко натриевых солонцах проводятся все виды агротехники, от вспашки до уборки урожая. То есть затрачиваются значительные материальные, денежные и трудовые ресурсы, которые не окупаются из-за низкого урожая.

В последнее время в результате трансформации сельскохозяйственных угодий происходит качественное изменение состава пашни. Поскольку более 83.9% пахотных земель республики размещено в лесостепной, степной и сухостепной зонах, здесь активно осуществляется освоение новых участков залежной пашни и пастбищ с солонцовыми почвами. Указанные действия привели к тому, что на самых плодородных южных черноземах и каштановых почвах пашни и особенно на вовлеченных в сельскохозяйственный оборот средних, мелких и корковых солонцах пастбищ зернового пояса образовались крупные вертикальные трещины шириной >3см. Из-за чего постепенно снизилась урожайность зерновых культур [5, 6]. Причина этого явления заключается в том, что с момента освоения целины (1954-1960 гг.) на равнинных самых плодородных черноземах и каштановых почвах активно развивалась ветровая и водная эрозия, которая продолжается по сегодняшней день [7]. Это привело к постепенному уменьшению мощности гумусового горизонта на них и особенно на вновь освоенных пастбищных маломощных солонцах, что в конечном счете стало причиной механической инверсии верхних горизонтов А и B_1 [8]. При ежегодной вспашке плуг постепенно захватывает часть солонцового горизонта B_1, который вовлекался в пахотный горизонт и активно перемешивался. Особенно пострадали и подверглись деградации вновь освоенные под пашню солонцы и солонцеватые почвы пастбищ, которые имеют маломощный гумусовый горизонт. Несмотря на то, что, солонцы считаются засоленными, они являются неразрывной частью геодермы и большим резервом кормового животноводства. Под влиянием длительной распашки сильно нарушается естественное строение солонцов, а часто и весь комплекс их физических, механических и физико-химических свойств [9].

На сегодняшний день фосфогипс остается единственным традиционным мелиорантом, используемым для улучшения солонцов и солонцеватых почв зернового пояса Казахстана. Его малая эффективность в щелочной среде почвы и экологическая небезопасность (отход производства фосфорных удобрений) известна давно. В США 25 лет тому назад отказались ее использовать. Именно поэтому необходимость поиска высокоэффективных экологически безопасных мелиорантов и разработка передовых технологий для природно-климатических и производственных условий зернового пояса нашей Республики показывает актуальность этой работы не только в Казахстане, но и на международном уровне. В этой связи целью наших исследований явилось определение мелиоративной эффективности серных и серосодержащих мелиорантов на деградированных мелких солонцах Акмолинской области для разработки стратегии их улучшения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Место полевого сбора почвенных образцов. Сбор почвенных образцов произведен на территории зерносеющего хозяйства в Коргалжинском районе Акмолинской области, которая занимается выращиванием зерновых культур. На территории хозяйства получили распространение темно-каштановые солонцеватые почвы с солонцами степными, выделяющиеся отдельными контурами. Образцы отобраны из опорного разреза, который заложен осенью (30.10.2025г). Координаты разреза N 50° 28'22,4", E070°46'23,4". Абсолютная высота точки исследования - 380 м. Разрез заложен на вспаханном сильнопятнистом участке поля №4 на неорошаемой пашне, где после уборки пшеницы и вспашки осталась стерня.

Методика лабораторного эксперимента. Для определения сравнительной мелиоративной эффективности серных и серосодержащих мелиорантов на мелких солонцах зерносеющего региона Акмолинской области нами проведен модельный эксперимент в условиях тепличной камеры. Последнее обеспечило поддержание оптимальной температуры воздуха и почвы на уровне 23-25°С. В течение эксперимента постоянная влажность изучаемых почв в стаканах (с учетом исходной гигроскопической влажности) в пределах оптимума (21% или 70% от НВ) поддерживалась ежедневным взвешиванием и поливом дистиллированной водой по мере необходимости. Для эксперимента использованы прозрачные мерные стаканы объемом 275 мл. Образцы почв для эксперимента отбирались из солонцового горизонта B_1 мелкого солонца поля №4 из глубины 7-45 см [10]. Взятые образцы высушивались до воздушно-сухого состояния и после тщательного их перемешивания, подготовленный средний образец пропускала через сито отверстием 2,0 мм. До начала опыта в этих образцах определялось ее исходное состояние, что позволило рассчитать количество серных и серосодержащих мелиорантов: элементарная сера 13,12 т/га (99,9% S), наносера 14,82 т/га (80% S + 20% Ca), серосодержащая пульпа 15,99 т/га (86% S+13,057% зола), жидкая сера 43,89 т/га (22,8% S + 15,2N + адьюванты), раствор (1%) серной кислоты 19,68 т/га и фосфогипс 40,54 т/га.

Для расчета принята величина плотности солонцового горизонта на уровне 1,50 г/см^3. Поскольку изучаемые почвы являются смешанно содово–хлоридно-сульфатными магнезиальными мелкими солонцами, то расчет необходимого количества гипса, элементарной серы и серной кислоты проводился по усовершенствованной формуле Б.М. Агаева [11]. По истечению 30 дневной инкубации серных и серосодержащих мелиорантов определили: pH - ГОСТ-26423-85, ионный состав водной вытяжки – ГОСТ 26423-85; 26428-85, поглощенные основания - ГОСТ 26487-85; 26950-86) [12, 13].

Статистический анализ. Модельный эксперимент проведен по схеме полностью рандомизированного однофакторного опыта (one-way ANOVA): фактором служил вариант внесения мелиоранта (7 уровней, включая контроль), для каждого варианта использовали три независимые повторности (n=3). Помимо F критерия и *p*-значений оценивали практическую величину эффекта: для классической ANOVA рассчитывали показатель размера эффекта (ω^2) и 95% доверительные интервалы для разницы «вариант – контроль». Для интегральной оценки изменений комплекса свойств почвы дополнительно проводили анализ главных компонент (PCA) по стандартизированным данным; результаты представляли на диаграмме рассеяния по первым двум компонентам с указанием вклада объяснённой дисперсии [14-18].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В подзоне темно-каштановых почв Коргалжинского района автоморфные мелкие солонцы образуют комплексы с незасоленными почвами. Они в настоящее время активно вовлечены в неорошаемую пашню. Эти почвы обладают низким уровнем плодородия. Об этом свидетельствуют данные параметров почв контрольного варианта. Так, например, в почвенных образцах содержание HCO_3^- и CO_3^{2-} ионов было очень высоким (0.88 и 0.24 мг-экв). Высокое содержание данных солей обусловило повышенную щёлочность среды (pH 8,73), что оказывает негативное влияние на рост и развитие большинства растений (таблица 1).

Однофакторный дисперсионный анализ (ANOVA) показал, что внесение серных и серосодержащих мелиорантов оказывают статистически значимое влияние на параметры солонцового горизонта мелких солонцов. В частности, для концентрации практически всех ионов водной вытяжки, электропроводности и ее pH выявлены значительные различия между вариантами (p<0.001).

Таблица 1 – Влияние 30-дневной инкубации серных и серосодержащих мелиорантов на параметры раствора автоморфных мелких солонцов, среднее n=3

Варианты	HCO_3^-	CO_3^{2-}	Cl^-	SO_4^{2-}	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+
Контроль	0.88 ± 0.01	0.24 ± 0.01	1.31 ± 0.01	2.13 ± 0.01	0.27 ± 0.01	0.91 ± 0.01	3.12 ± 0.01	0.01 ± 0.00
Tes1	0.71 ± 0.12	0.05 ± 0.09	1.20 ± 0.07	2.18 ± 0.08	0.71 ± 0.10	0.71 ± 0.14	2.65 ± 0.05	0.02 ± 0.00
Tns2	0.55 ± 0.05	0.00 ± 0.00	1.34 ± 0.34	3.50 ± 0.39	1.45 ± 0.19	0.90 ± 0.20	3.01 ± 0.42	0.02 ± 0.00
Tsp3	0.75 ± 0.02	0.07 ± 0.02	1.50 ± 0.08	2.51 ± 0.51	0.55 ± 0.16	0.96 ± 0.10	3.23 ± 0.46	0.02 ± 0.00
Tsl4	1.00 ± 0.04	0.00 ± 0.00	12.93 ± 0.46	0.35 ± 0.30	4.99 ± 0.24	4.77 ± 0.20	4.08 ± 0.37	0.43 ± 0.02
Tsa5	0.47 ± 0.06	0.00 ± 0.00	1.31 ± 0.36	6.98 ± 0.29	3.18 ± 0.14	1.52 ± 0.14	4.05 ± 0.71	0.02 ± 0.00
Tph6	0.35 ± 0.02	0.00 ± 0.00	8.54 ± 0.75	0.47 ± 0.57	2.78 ± 0.56	1.55 ± 0.20	3.95 ± 0.47	1.08 ± 0.37
F – крит.	47,721	17,707	462,653	115,136	135,085	255,203	5,612	24,906
P - value	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.0038	<0.001

Все испытанные серосодержащие мелиоранты вызвали снижение показателя pH по сравнению с контрольным вариантом, что подтверждается отрицательными значениями разности средних (вариант – контроль). Однако степень выраженности и статистическая устойчивость этого эффекта различались между вариантами. Наиболее значительное снижение pH отмечено на варианте с жидкой серой (Tsl4), где в отношении контроля она опустилась до 7,75 (таблица 2). Доверительный интервал был относительно узким и не пересекал нулевую отметку, а повторности демонстрировали высокую согласованность, что свидетельствует о статистически устойчивом достоверном эффекте данного мелиоранта (рисунок 1).

Выраженное снижение pH свидетельствует о высокой кислотогенерирующей активности жидкой серы в течение 30-дневного периода инкубации. Подкисление солонцовой почвы способствует увеличению подвижности кальция и магния, а также ослаблению закрепления натрия в обменных позициях почвенного поглощающего комплекса. Подкисление почвенной среды является одним из ключевых факторов, обеспечивающих замещение обменного натрия кальцием. По мере снижения щёлочности возрастает растворимость кальцийсодержащих минералов и концентрация ионов Ca^{2+} в почвенном растворе, что способствует более эффективному вытеснению Na^{+} из обменного комплекса почвы. Корреляционный анализ выявил выраженные отрицательные связи между долей обменного натрия и долей обменного кальция, что отражает антагонистический характер их распределения в катионном комплексе. Варианты с фосфогипсом (Tph6), серной кислотой (Tsa5) и жидкой наносерой (Tns2) также характеризовались устойчивым снижением pH до 8.27, 8.35 и 8.41, разница которого в отношении контроля (pH 8,73) находилась в пределах около 0,3–0,5 единиц. Доверительные интервалы для этих вариантов располагались полностью в отрицательной области, что свидетельствует о статистически подтверждённом подкисляющем эффекте. Если на варианте с фосфогипсом внутривариантная вариабельность по значению pH была минимальной, то на остальных двоих (Tsa5 и Tns2) вариабельность между повторностями была умеренной и несколько широкой. Масштаб изменения указывает на умеренную, но стабильную трансформацию кислотно-щелочного состояния почвы.

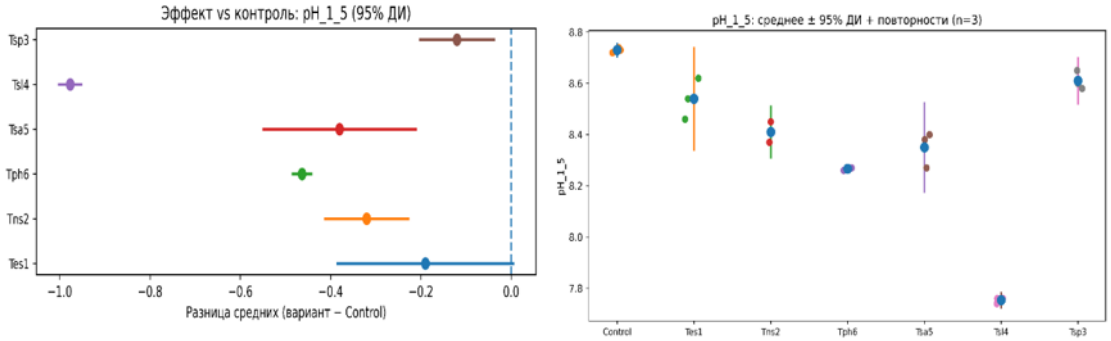


Рисунок 1 - Изменение реакции почвенного раствора ($pH_{1:5}$) под действием мелиорантов (А) и по вариантам опыта (Б)

На варианте с элементарной серой (Tes1) снижение pH было менее выраженным (порядка 0,2 единицы), а доверительный интервал приближался к нулевой линии или частично её перекрывал, что указывает на ограниченную статистическую устойчивость различий реакции среды. Несмотря на совпадение направления эффекта с другими вариантами, интенсивность изменения оказалась минимальной. Вариант с серной пульпой (Tsp3) демонстрировал относительно небольшое уменьшение pH (около 0,15 единицы), однако доверительный интервал не пересекал нулевую отметку, что позволяет рассматривать данный эффект как статистически подтверждённый, хотя и умеренный по величине. Таким образом, наиболее выраженный мелиоративный эффект показала жидкая сера (Tsl4), тогда как остальные мелиоранты продемонстрировали умеренное или слабое подкисление.

В составе поглощенных оснований солонцового горизонта зафиксировано сравнительно высокое содержание магния (47.20% от СЕС), чем натрия (8.40% от СЕС), что говорит об их магнезиальности. Первое испытание серных и серосодержащих мелиорантов в сравнении с контрольным вариантом показало их эффективность. После 30 дневной инкубации их эквивалентных доз, ионный состав почвенного раствора и состав поглощенных оснований мелких солонцов претерпели весьма заметные изменения. Если в начале опыта до внесения мелиорантов доля обменного натрия составила 8,40% от суммы, то после инкубации серных мелиорантов она в среднем снизилась до 7.90, 7.80 и 7,50% от емкости катионного обмена на вариантах с жидкой наносерой (Tns2, Tsl4) и серной кислотой (Tsa5), т.е. обеспечилось рассолонцевание почвы (таблица 2).

Таблица 2 – Влияние 30-дневной инкубации серных и серосодержащих мелиорантов на параметры плодородия автоморфных мелких солонцов, среднее n=3

Варианты	EC, dS/m	pH	Обменные катионы, % от CEC				CEC, мг-экв на 100г почвы	AEE
			Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^{+}	K^{+}		
Контроль	0.93 ± 0.00	8.73 ± 0.01	44.20 ± 0.00	47.23 ± 0.06	8.37 ± 0.06	0.20 ± 0.00	31.19 ± 0.03	0,000
Tes1	0.86 ± 0.01	8.54 ± 0.08	51.60 ± 4.50	38.47 ± 3.84	9.47 ± 1.17	0.47 ± 0.06	30.78 ± 1.34	0,335
Tns2	1.12 ± 0.03	8.41 ± 0.04	54.47 ± 1.25	37.13 ± 0.96	7.90 ± 0.35	0.40 ± 0.00	31.96 ± 1.00	0,046
Tsp3	1.00 ± 0.03	8.61 ± 0.04	51.97 ± 2.98	37.67 ± 3.78	9.90 ± 0.78	0.50 ± 0.00	28.43 ± 2.69	0,757
Tsl4	2.52 ± 0.04	7.75 ± 0.01	58.27 ± 3.37	33.20 ± 6.75	7.90 ± 4.10	0.67 ± 0.15	27.50 ± 1.29	-0,005
Tsa5	1.83 ± 0.04	8.35 ± 0.07	59.73 ± 2.66	32.37 ± 2.46	7.47 ± 0.25	0.40 ± 0.00	32.84 ± 1.12	0,003
Tph6	1.73 ± 0.09	8.27 ± 0.01	46.73 ± 2.93	39.83 ± 1.89	10.30 ± 0.70	3.17 ± 5.48	29.91 ± 2.52	-2,142
F – крит.	62,32	147,183	11,688	5,935	1,343	0,755	3,932	-
P - value	<0.001	<0.001	<0.001	0.0029	0.3027	0.6162	0.0163	-

AEE - агроэкономическая эффективность, интегральный показатель, отражающий отношение суммарного нормированного эффекта изменения химических показателей почвы относительно контрольного варианта к затратам на приобретение мелиоранта.

В поглощающем комплексе за счет эффекта серных мелиорантов повышается доля поглощенного кальция по сравнению с контрольным вариантом. Больше всего кальция поступило в поглощающий комплекс почв вариантов с жидкой серой (Tsl4) и серной кислотой (Tsa5), где ее доля составила соответственно 58.10 и 59.80% от СЕС. В этих же вариантах установлено снижение доли поглощенного магния до 33.40 и 32.30%, которая в почве контрольного варианта была высокой (47.20%). Однако, в почвенном растворе варианта с жидкой серой (Tsl4) образовалась несколько повышенная концентрация HCO_3^- (1,00 мг-экв), а на варианте с серной кислотой (Tsa5) самая низкая (0,47 мг-экв) в отношении контрольного варианта (0,88 мг-экв). Несмотря на относительно в почвах отмеченных вариантов существенно повышается содержание хлор и сульфат ионов, которые составили соответственно 12.93 и 6.98 мг-экв

на 100 г почвы (таблица 3). На вытеснение обменного натрия из поглощающего комплекса в раствор на вариантах с жидкой серой (Tsl4) и серной кислотой (Tsa5) указывает ее содержание в водной вытяжке, которое после мелиорации стало самым высоким среди мелиорантов (4.08 и 4.05 мг-экв). Кроме того, на вариантах с серной кислотой (Tsa5) и фосфогипсом (Tph6) по сравнению с контрольным вариантом заметно повышается содержание кальция и магния в почвенном растворе, особенно на варианте с жидкой серой (Tsl4, 4,99 и 4,77 мг-экв). Емкость катионного обмена изменяется менее существенно.

Биохимическое окисление природных соединений серы осуществляется сероокисляющими автотрофными микроорганизмами рода *Thiobacillus* [19]. Тионовые бактерии - хемолитоавтотрофы, использующие энергию окисления серы кислородом для процессов хемосинтеза. Ее отдельные виды (*T. Thiporus, T. ferrooxidans* и *T. Neopolitanus* и др.), развивающиеся преимущественно в щелочных и слабокислых условиях наиболее интенсивно окисляют элементарную серу до оксидных форм, которые соединяясь с водой образуют серную кислоту: $S \rightarrow SO_3^{2-} \rightarrow SO_4^{2-} + H_2O \rightarrow H_2SO_4$. Образовавшаяся серная кислота инициирует мобилизацию кальция из карбонатов. Это приводит к замещению натрия в почвенном поглощающем комплексе и снижению щелочности.

С точки зрения агроэкономической эффективности (АЕЕ) высокую эффективность в отношении контроля показали варианты с элементарной серой (Tes1) и серной пульпой (Tsp3). Значения АЕЕ в отмеченных вариантах составили 0,335 и 0,757 (таблица 2). На среднем уровне оказались варианты с жидкой наносерой (Tns2) и серной кислотой (Tsa5). Отрицательными значениями АЕЕ отличились варианты с жидкой серой (Tsl4) и фосфогипсом (Tph6). Это свидетельствуют о том, что несмотря на положительный эффект жидкой серы на химический состав солонцов, ее закупочная цена не делает ее экономический рентабельной (-0,005).

Анализ главных компонент (PCA), выполненный на основе показателей почвы, позволил выявить интегральные различия между вариантами опыта (рисунок 2). Первая главная компонента (PC1) объясняла 36,9%, а вторая компонента (PC2) - 21,3% общей дисперсии данных. Совокупно первые два компонента описывали 58,2% вариабельности, что указывает на удовлетворительную репрезентативность двумерной проекции. Контрольный вариант сформировал отдельный кластер в правой части графика (положительные значения PC1), что свидетельствует о его отчетливом отличии от большинства обработанных вариантов по совокупности почвенных показателей. Варианты с жидкой серой (Tsl4) и частично серной кислотой (Tsa5) смещались в левую область по оси PC1, демонстрируя значительное отклонение от контрольного варианта. Особенно выраженная дифференциация наблюдалась для жидкой серы (Tsl4), точки которой формировали компактную группу в зоне отрицательных значений PC1, что указывает на системное изменение комплекса почвенных свойств. Вариант с фосфогипсом располагался преимущественно в нижней части графика (отрицательные значения PC2), формируя отдельное направление вариации, отличное как от контроля, так и от других мелиорантов. Это свидетельствует о специфическом влиянии данного мелиоранта на структуру взаимосвязей между показателями.

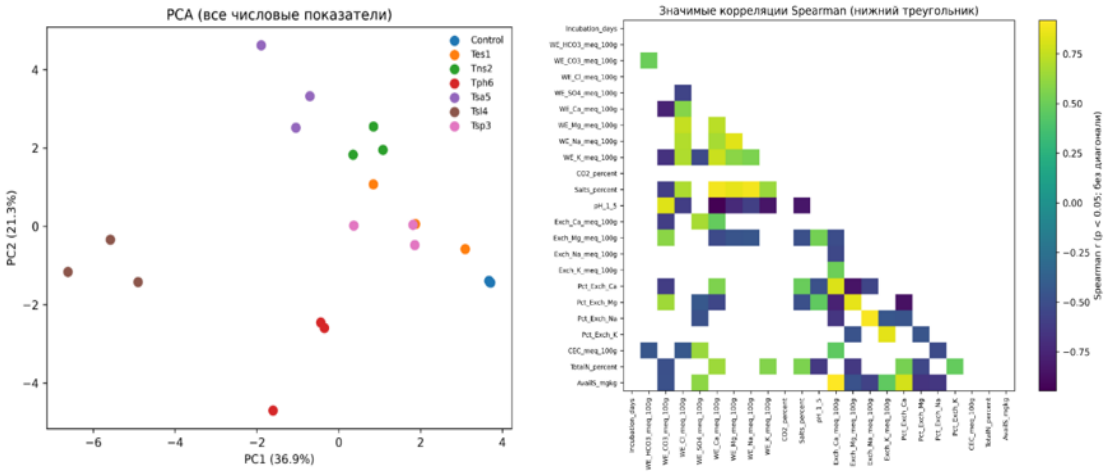


Рисунок 2 - Многомерный (А) и корреляционный анализ взаимосвязи между почвенными параметрами мелкого солонца (Spearman, p<0,05)

Варианты с жидкой наносерой (Tns2) и элементарной серой (Tes1) занимали промежуточное положение, частично перекрываясь с контрольным вариантом, что указывает на умеренную степень изменений по сравнению с исходным состоянием почвы. Вариант с серной пульпой (Tsp3) отличился разбросанным расположением точек в центральной области графика, что показывает неоднородность реакции ее почвенных показателей. В целом PCA подтвердил, что различные мелиоранты вызывают неодинаковые системные изменения комплекса почвенных свойств. Наиболее выраженное интегральное отличие от контроля наблюдалось для жидкой серы (Tsl4) и серной кислоты (Tsa5), тогда как элементарная сера (Tes1) и жидкая наносера (Tns2) демонстрировали более умеренные трансформации. Полученные результаты свидетельствуют о том, что изменение реакции почвы, обменного комплекса и ионного состава формирует различимые многомерные профили воздействия мелиорантов, что подтверждает целесообразность использования интегрального статистического подхода при оценке их эффективности.

Анализ ранговых корреляций Спирмана позволил выявить статистически значимые взаимосвязи между показателями солевого состава, обменного комплекса и реакцией почвенной среды (рисунок 2). Для интерпретации учитывались только коэффициенты корреляции, достоверные при p<0,05. Отмечена выраженная положительная корреляция между содержанием сульфатов, натрия и магния в водной вытяжке, а также их связью с суммой солей. Это указывает на совместное формирование солевого фона почвы и подтверждает, что основную долю растворимых солей формируют именно сульфаты натрия и магния. При внесении кальцийсодержащих или серосодержащих мелиорантов возможно образование легкорастворимых солей, в частности Na_2SO_4). Таким образом, сульфат-ион выполняет двойную функцию: участвует в образовании растворимых натриевых солей и способствует поддержанию ионной силы раствора, влияя на равновесие обменных реакций. Содержание хлор иона также демонстрировало положительные связи с другими растворимыми катионами, отражая интегральный характер солевого накопления.

В солонцовом горизонте водородный показатель имел отрицательные корреляции с содержанием раствори-

мых солей и обменного натрия. Это свидетельствует о том, что снижение щелочности сопровождается уменьшением натриевой нагрузки и общей солёности почвенного раствора. Одновременно выявлены положительные корреляции pH с показателями, характеризующими кальциевую насыщенность обменного комплекса, что отражает связь реакции среды с состоянием катионного баланса. Процентная доля обменного натрия демонстрировала сильные отрицательные корреляции с процентной долей обменного кальция и магния, что отражает антагонистический характер распределения катионов в обменном комплексе солонцовой почвы. Обменный кальций и магний положительно коррелировали между собой, что указывает на их совместное участие в стабилизации почвенной коллоидной фазы.

Ёмкость катионного обмена (CEC) проявляла положительные связи с содержанием кальция и магния. Корреляционная структура подтверждает взаимосвязь функционально связанных блоков показателей: солевой блок (растворимые ионы, сумма солей, обменный натрий) и обменный блок (CEC, обменный кальций и магний, процентная доля катионов). Реакция почвы (pH) выступает интегральным показателем, связывающим оба блока, и отражает перераспределение катионов в системе «раствор - обменный комплекс».

Таким образом, статистически значимые корреляции подтверждают, что внесение серных и серосодержащих мелиорантов приводят к согласованным изменениям солевого состава и катионного баланса солонцового горизонта мелких солонцов, а не к изолированным изменениям отдельных показателей. Поскольку испытание серных и серосодержащих мелиорантов осуществлялось в контролируемых условиях, то ее результаты имеют определённые ограничения, ввиду того, что во время инкубации отсутствовало влияние естественных факторов почвообразования, условий режимов и растительного покрова. В связи с этим полученные данные требуют дополнительной верификации в полевых экспериментах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённое лабораторное исследование показало, что внесение серных и серосодержащих мелиорантов в мелкие солонцы в условиях 30-дневной инкубации вызывает системные изменения химических свойств, затрагивающие как почвенный раствор, так и обменный комплекс. Наиболее чувствительным показателем оказалась реакция почвенной среды (pH), снижение которой наблюдалось во всех вариантах опыта. В случае жидкой серы (Tsl4) уменьшение достигало значительной величины (pH 7,75), относительно контроля (8,73), что свидетельствует о высокой реакционной активности мелиоранта и активном изменении кислотно-щелочного состояния почвы. Подкисление среды способствовало перераспределению катионов в системе «раствор - обменный комплекс» и создавало условия для замещения обменного натрия кальцием. Об этом свидетельствовало снижение доли обменного натрия в поглощающем комплексе до 7,80 и 7,50% от CEC на вариантах с жидкой серой (Tsl4) и серной кислотой (Tsa5) по сравнению с контрольным вариантом (8,40% от CEC). Вытесненный обменный натрий поступил в раствор, где ее содержание на указанных вариантах выросло до 4,08 и 4,05 мг-экв в отношении контроля (3,12 мг-экв). Кроме того, в поглощающем комплексе отмеченных вариантов опыта существенно увеличивается доля обменного кальция (58,10 и 59,80% от CEC) и существенно снижается доля обменного магния (33,40 и 32,30% от CEC), как среди мелиорантов, так и в отношении контроля (44,20 и 47,20% от CEC). Применение серных и серосодер-

жащих мелиорантов на мелких солонцах также способствует снижению концентрации гидрокарбонатов и нормальных карбонатов. В отношении первого самый минимум был установлен на вариантах с серной кислотой (0,47 мг-экв) и фосфогипсом (0,35 мг-экв). Нулевое значения содержания нормальных карбонатов было достигнуто на вариантах жидкой серой (Tns2, Tsl4), серной кислотой (Tsa5) и фосфогипсом (Tph6).

Корреляционный анализ выявил устойчивые антагонистические связи между долей обменного натрия и кальция, подтверждая ключевую роль Ca–Na-обмена в механизме химической мелиорации. Положительные взаимосвязи между растворимыми сульфатами, натрием и суммой солей указывают на формирование растворимых натриевых соединений как промежуточного этапа трансформации солонцовой почвы. Многомерный анализ (PCA) продемонстрировал чёткое разграничение вариантов опыта в пространстве главных компонент, что свидетельствует о комплексном характере воздействия серосодержащих мелиорантов. Полученные данные подтверждают, что эффективность химической мелиорации определяется не изолированным изменением отдельных показателей, а согласованной перестройкой химической системы почвы. Применение комплексного статистического подхода позволило выявить как прямые эффекты обработки, так и внутренние функциональные связи между почвенными показателями, что повышает достоверность оценки мелиоративной эффективности серосодержащих мелиорантов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант No. AP26101627).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Seitkali N., Naushabayev A., Mazkirat S., Vassilina T. Assessing the efficacy of ameliorants on saline-sodic soils: Laboratory insights for reclamation strategies // Eurasian Journal of Soil Science. - 2023. - № 4. - С. 328–334.

2. Ministry of Agriculture of the Republic of Kazakhstan. Consolidated analytical report on the state and use of lands of the Republic of Kazakhstan for 2022. - Astana, 2023.

3. IUSS Working Group. World Reference Base for Soil Resources 2014: International Soil Classification System for Naming Soils and Creating Legends for Soil Maps. - World Soil Resources Report. - 2014. - № 106. - P. 12.

4. Richards L.A. (ed.). Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils. - Washington, DC: United States Department of Agriculture, U.S. Salinity Laboratory, 1954.

5. Мухаметкаримов К.М., Кенжегулова С.О. Трещинообразование - естественный и антропогенный фактор деградации черноземов южных северо-востока Казахстана // Наука вчера, сегодня, завтра. - 2017. - № 7. - С. 51–62.

6. Елешев Р.Е., Конопьянов К.Е., Мухаметкаримов К.М., Кубенкулов К.К., Аскаров С.У., Поршнев Д.Г. Деградационные процессы на южных карбонатных черноземах при зернопаровой системе земледелия на северо-востоке Казахстана // Вестник сельскохозяйственной науки Казахстана. - Алматы: Бастау, 2008. - С. 21–25.

7. Suleimenov M., Saparov A., Akshalov K., Kaskarbayev Z. Land degradation issues in Kazakhstan and measures to address them: research and adoption // Environmental Science, Geography. - 2011. – URL: https://api.semanticscholar.org/CorpusID:210051492.

8. Систематический список и основные диагностические показатели почв равнинной территории Республики Казахстан. - Т. I. - Алма-Ата, 1995.

9. Lyubimova I.N., Novikova A.F. Changes in the properties of solonetzic soil complexes in the dry steppe zone under anthropogenic impacts // Eurasian Soil Science. - 2016. - Т. 49. - № 5. - P. 581–590.

10. International Organization for Standardization. Soil Quality - Sampling - Part 1: Guidance on the Design of Sampling Programmes (ISO Standard No. 10381-1:2002). - Geneva, Switzerland: ISO, 2002.

11. Methodical Instructions for Laboratory and Practical Exercises in Reclamation Soil Science. - M., USSR, 1981. - Original work published in Russian.

12. Estefan G., Sommer R., Ryan J. Methods of Soil, Plant, and Water Analysis. - 3rd ed. - Beirut: ICARDA, 2013.

13. Carter M.R., Gregorich E.G. (eds.). Soil Sampling and Methods of Analysis. - 2nd ed. - Boca Raton, FL: CRC Press, 2008.

14. Montgomery D.C. Design and Analysis of Experiments. - 9th ed. - Wiley, 2017.

15. Field A. Discovering Statistics Using IBM SPSS Statistics. - 5th ed. - Sage, 2018.

16. Zuur A.F., Ieno E.N., Smith G.M. Analyzing Ecological Data. - Springer, 2007.

17. Legendre P., Legendre L. Numerical Ecology. - 3rd ed. - Elsevier, 2012.

18. Abdi H., Williams L.J. Principal component analysis // Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics. - 2010. - Vol. 2. - № 4. - P. 433–459.

19. Глобальный биогеохимический цикл серы и влияние на него деятельности человека. - М.: Наука, 1983.

REFERENCES

1. Seitkali N., Naushabayev A., Mazkirat S., Vassilina T. Assessing the efficacy of ameliorants on saline-sodic soils: Laboratory insights for reclamation strategies // Eurasian Journal of Soil Science. - 2023. - T. 12. - № 4. - P. 328–334.

2. Ministry of Agriculture of the Republic of Kazakhstan. Consolidated analytical report on the state and use of lands of the Republic of Kazakhstan for 2022. - Astana, 2023.

3. IUSS Working Group. World Reference Base for Soil Resources 2014: International Soil Classification System for Naming Soils and Creating Legends for Soil Maps. - World Soil Resources Report. - 2014. - № 106. - P. 12.

4. Richards L.A. Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils. - Washington, DC: United States Department of Agriculture, U.S. Salinity Laboratory, 1954.

5. Muhametkarimov K.M., Kenzhegulova S.O. Treshinoobrazovanie - estestvennyj i antropogennyj faktor degradacii chernozemov yuzhnyh severo-vostoka Kazahstana // Nauka vchera, segodnya, zavtra. - 2017. - № 7. - P. 51–62.

6. Eleshev R.E., Konopyanov K.E., Muhametkarimov K.M., Kubenkulov K.K., Askarov S.U., Porshnev D.G. Degradacionnye processy na yuzhnyh karbonatnyh chernozemah pri zernoparovoj sisteme zemledeliya na severo-vostoke Kazahstana // Vestnik selskohozyajstvennoj nauki Kazahstana. - Almaty: Bastau, 2008. - P. 21–25.

7. Suleimenov M., Saparov A., Akshalov K., Kaskarbayev Z. Land degradation issues in Kazakhstan and measures to address them: research and adoption // Environmental Science, Geography. - 2011. – URL: https://api.semanticscholar.org/CorpusID:210051492

8. Sistematicheskij spisok i osnovnye diagnosticheskie pokazateli pochv ravninnoj territorii Respubliki Kazahstan. - T. I. - Alma-Ata, 1995.

9. Lyubimova I.N., Novikova A.F. Changes in the properties of solonetzic soil

complexes in the dry steppe zone under anthropogenic impacts // Eurasian Soil Science. - 2016. - T. 49. - № 5. - P. 581–590.

10. International Organization for Standardization. Soil Quality - Sampling - Part 1: Guidance on the Design of Sampling Programmes (ISO Standard No. 10381-1:2002). - Geneva, Switzerland: ISO, 2002.

11. Methodical Instructions for Laboratory and Practical Exercises in Reclamation Soil Science. - Moscow, USSR, 1981. - Original work published in Russian.

12. Estefan G., Sommer R., Ryan J. Methods of Soil, Plant, and Water Analysis. - 3rd ed. - Beirut: ICARDA, 2013.

13. Carter M.R., Gregorich E.G. Soil Sampling and Methods of Analysis. - 2nd ed. - Boca Raton, FL: CRC Press, 2008.

14. Montgomery D.C. Design and Analysis of Experiments. - 9th ed. - Wiley, 2017.

15. Field A. Discovering Statistics Using IBM SPSS Statistics. - 5th ed. - Sage, 2018.

16. Zuur A.F., Ieno E.N., Smith G.M. Analyzing Ecological Data. - Springer, 2007.

17. Legendre P., Legendre L. Numerical Ecology. - 3rd ed. - Elsevier, 2012.

18. Abdi H., Williams L.J. Principal Component Analysis // Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics. - 2010. - T. 2. - № 4. - P. 433–459.

19. Global'nyy biogeokhimicheskiy tsikl sery i vliyaniye na nego deyatel'nosti cheloveka. - M.: Nauka, 1983.

ТҮЙІН

А.Х. Наушабаев[1], С.С. Наушабаева[1], Н. Сейткали[1], Т.К. Василина, К.О. Караева[1]*, Н.П. Аубакиров[1]

АҚМОЛА ОБЛЫСЫНЫҢ СЕМИАРИДТІК АЙМАҒЫНДАҒЫ ЕГІСТІКТЕ ДЕГРАДАЦИЯЛАНҒАН КЕБІР ТОПЫРАҚТАРДЫҢ ИОНДЫҚ КЕШЕНІНІҢ КҮКІРТТІ МЕЛИОРАНТТАР ӘСЕРІНЕН ӨЗГЕРУІ: ЗЕРТХАНАЛЫҚ ЗЕРТТЕУ

*[1]Қазақ ұлттық аграрлық зерттеу университеті, 050010, Алматы, Абай даңғылы, 8, Қазақстан, *e-mail: askhat.naushabayev@kaznaru.edu.kz*

Ақмола облысының семиаридтік аймағындағы ұсақ кебір топырақтары алмаспалы магний мен натрийдің жоғары мөлшерімен, күшті сілтілі ортасымен және құрылымының тұрақсыздығымен сипатталады. Осыған қарамастан, олар суарылмайтын егістікке жерлерге белсенді түрде жұмылдырылады және антропогендік деградацияға ұшыраған. Оларды қалпына келтіру стратегиясын әзірлеу үшін ұсақ кебір топырақтардың химиялық қасиеттеріне алты күкірт және күкірт құрамдас мелиоранттардың қысқа мерзімді әсерін бағалау мақсатында модельдік зертханалық зерттеулер жүргізілді. Құрамында күкірт бар мелиоранттарды ұсақ сортаңдарға енгізу топырақ ерітіндісінің құрамына да, топырақты сіңіру кешенінің күйіне де әсер ететін өзара байланысты физика-химиялық процестер кешенін бастады. Өзгерістер жүйелі болған, оны бір факторлы талдау және PCA мен корреляциялық талдау нәтижелері растайды. Топырақтың pH-ы ең сезімтал параметр болды, оның мәні барлық нұсқаларда төмен қарай ығысқан. Сонымен қатар, тәжірибелік нұсқалар арасында қышқылдану дәрежесі өзгеріп отырған. Мелиоранттардың ішінде сұйық күкіртті қолдану бақылау нұсқасымен салыстырғанда pH-тың 8,73-тен 7,75-ке дейін максималды төмендеуіне ықпал етті. Бұл «топырақ ерітіндісі - алмаспалы кешені» жүйесіндегі қышқыл-негіз балансының жылдам өзгеруін көрсетеді. Сұйық күкірт және күкірт қышқылы енгізілген нұсқалардың нәтижелері бақылаудан алшақтау болды, бұл олардың еритін иондар мен алмасу кешенінің параметрлеріндегі ең үлкен өзгерістерді көрсетті. Бұл мелиоранттар 30 күндік инкубация кезінде жеке параметрлерге емес, ұсақ тұзды сулардың бүкіл химиялық жүйесіне әсер етті. Көп реттік талдау (PCA) мәліметтерінен күкірт құрамдас мелиоранттардың ұсақ кебір топырақтарға әсер ету қарқын-

дылығына байланысты олар жеке кластерлер түзетінін көрсетті. Корреляциялық талдау алмаспалы натрий мен кальцийдің үлестері арасындағы айқын антагонистік байланыстарды анықтады, бұл кебір топырақтардың өзгеруіндегі Ca-Na алмасу процестерінің негізгі рөлін растайды. Осылайша, зерттеу нәтижелері қысқа мерзімде топырақ ерітіндісі мен ұсақ тұзды сіңіру кешенінің химиялық құрамын өзгерткен күкірті бар ең тиімді мелиоранттарды анықтауға мүмкіндік берді.

Түйінді сөздер: автоморфты ұсақ кебірлер, семиаридтік аймақ, Ақмола облысы, деградация, мелиорация, күкірт және күкірт құрамдас мелиоранттар.

SUMMARY

A. Naushabayev[1], S. Naushabayeva[1], N. Seitkali[1], T. Vassilina, K. Karayeva[1]*, N. Aubakirov

TRANSFORMATION OF THE IONIC COMPLEX OF DEGRADED SOLONETZ SOILS OF THE ARABLE LAND OF THE SEMIARIDE ZONE OF THE AKMOLA REGION UNDER THE INFLUENCE OF SULFUR AMELIORANTS: A LABORATORY STUDY

*[1]Kazakh National Agrarian Research University, 050010, Almaty, Abai ave., 8, Kazakhstan, *e-mail: askhat.naushabayev@kaznaru.edu.kz*

Small solonetz soils in the semiarid zone of the Akmola region are characterized by elevated levels of exchangeable magnesium and sodium, a highly alkaline pH, and structural instability. Despite this, they are actively converted into non-irrigated arable land and are susceptible to anthropogenic degradation. To develop a restoration strategy, model laboratory studies were conducted to assess the short-term impact of six sulfur and sulfur-containing ameliorants on the chemical properties of small solonetz soils. The introduction of sulfur-containing ameliorants into shallow salt wells initiated a complex of interrelated physico-chemical processes affecting both the composition of the soil solution and the state of the soil absorbing complex. The changes were systemic, as confirmed by both single-factor analysis and the results of PCA and correlation analysis. The most sensitive parameter was soil pH, which shifted downward in all treatments. Moreover, the degree of acidification varied between the experimental treatments. Among the ameliorants, the use of liquid sulfur contributed to the greatest decrease in pH, from 8.73 to 7.75, compared to the control treatment. This indicates a rapid change in the acid-base balance in the "soil solution - exchange complex" system. The treatments with liquid sulfur and sulfuric acid were the most distant from the control, demonstrating the greatest shifts in both soluble ions and exchange complex parameters. During the monthly incubation, these ameliorants did not affect individual parameters, but the entire chemical system of small salt wells. Multivariate analysis (PCA) revealed that sulfur-containing ameliorants form distinct clusters depending on the intensity of their impact on small solonetz soils. Correlation analysis revealed pronounced antagonistic relationships between the proportions of exchangeable sodium and calcium, confirming the key role of Ca–Na exchange processes in the transformation of solonetzic soils. Thus, the research results made it possible to identify the most effective sulfur-containing ameliorants, which in a short time changed the chemical composition of the soil solution and the absorbing complex of small salt deposits.

Keywords: automorphic small solonetz soils, semiarid zone, Akmola region, degradation, reclamation, sulfur and sulfur-containing ameliorants

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

1. Наушабаев Асхат Хамитович - ассоциированныи профессор кафедры «Почвоведение, агрохимия и экология», PhD, https://orcid.org/0000-0001-8291-265X, e-mail: askhat.naushabayev@kaznaru.edu.kz

2. Наушабаева Светлана Серікқызы - младший научный сотрудник, магистр, https://orcid.org/0009-0006-8518-7493, e-mail: sveta.naushabaeva@mail.ru

3. Сейткали Нурзихан **-** старший преподаватель кафедры «Почвоведение, агрохимия и экология», PhD, https://orcid.org/0000-0003-0942-8188,
e-mail: nurzi.seitkali@mail.ru

4. Василина Турсунай Кажымуратовна - ассоциированныи профессор кафедры «Почвоведение, агрохимия и экология», PhD, https://orcid.org/0000-0003-0554-9839, e-mail: v_tursunai@mail.ru

5. Караева Карлыга Оспановна **-** старший преподаватель кафедры «Почвоведение, агрохимия и экология», PhD, https://orcid.org/0000-0002-4074-5352, e-mail: karlygakaraeva@gmail.com

6. Аубакиров Нурымжан Паржанович **-** старший преподаватель кафедры «Почвоведение, агрохимия и экология», PhD, https://orcid.org/0000-0002-7340-2735, e-mail: aubakirov.nurimzhan@yandex.ru

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.

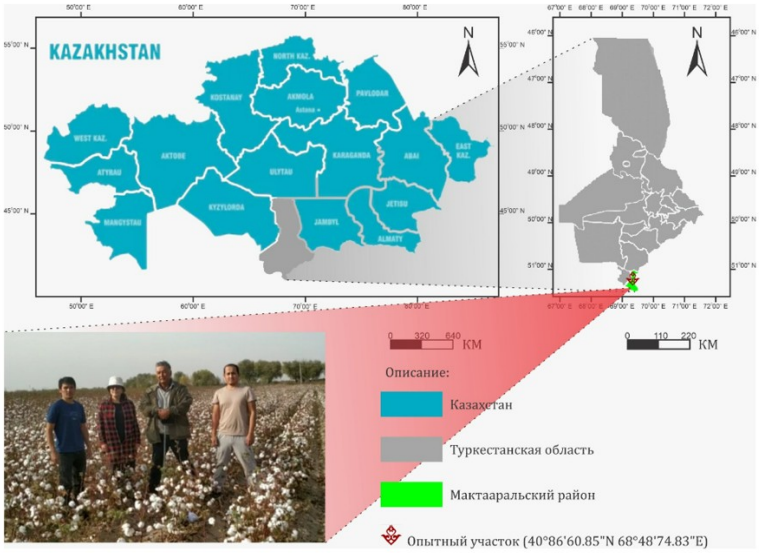


Рисунок 1 – Карта размещения опытного поля хлопчатника

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).

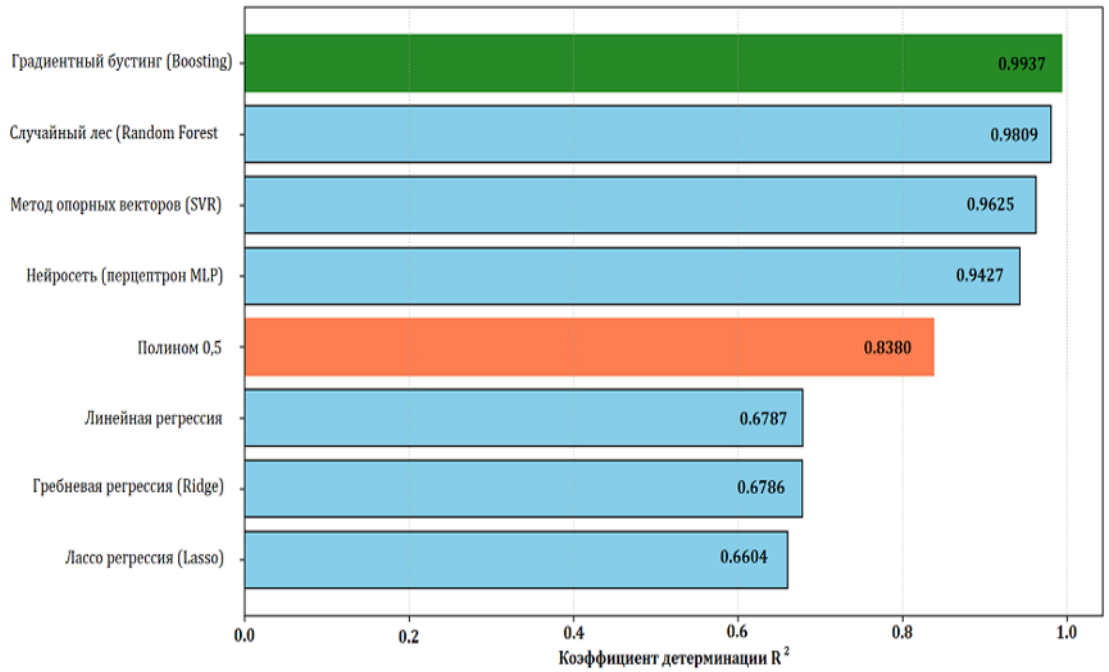


Рисунок 2 – Сравнительный анализ коэффициентов детерминации (R^2) моделей регрессии и машинного обучения на полных данных

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).

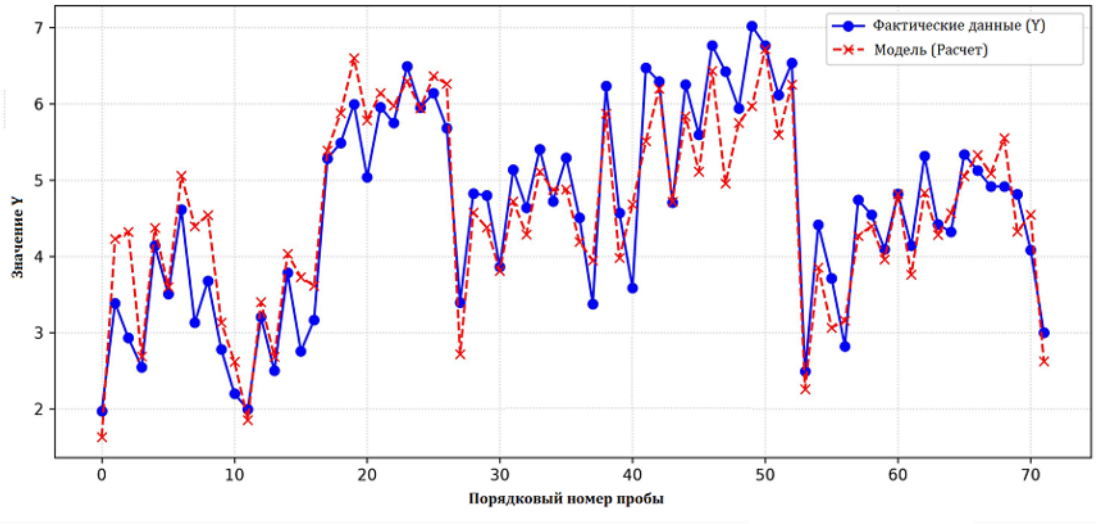


Рисунок 3 – Сопоставление фактических значений урожайности хлопка-сырца с теоретическим трендом нелинейной модели регрессии по номерам проб

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.

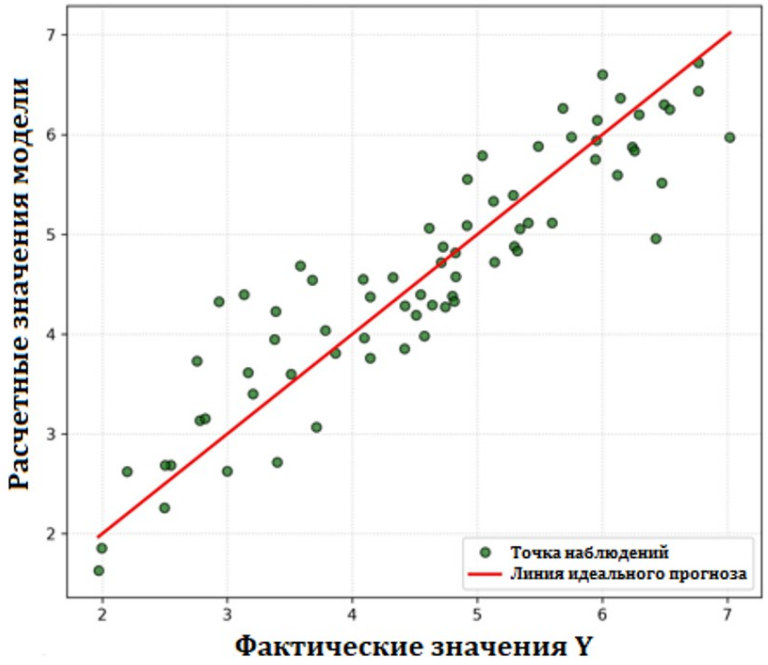


Рисунок 4 – Диаграмма рассеяния фактических и расчетных значений урожайности для нелинейной радикальной модели регрессии

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).

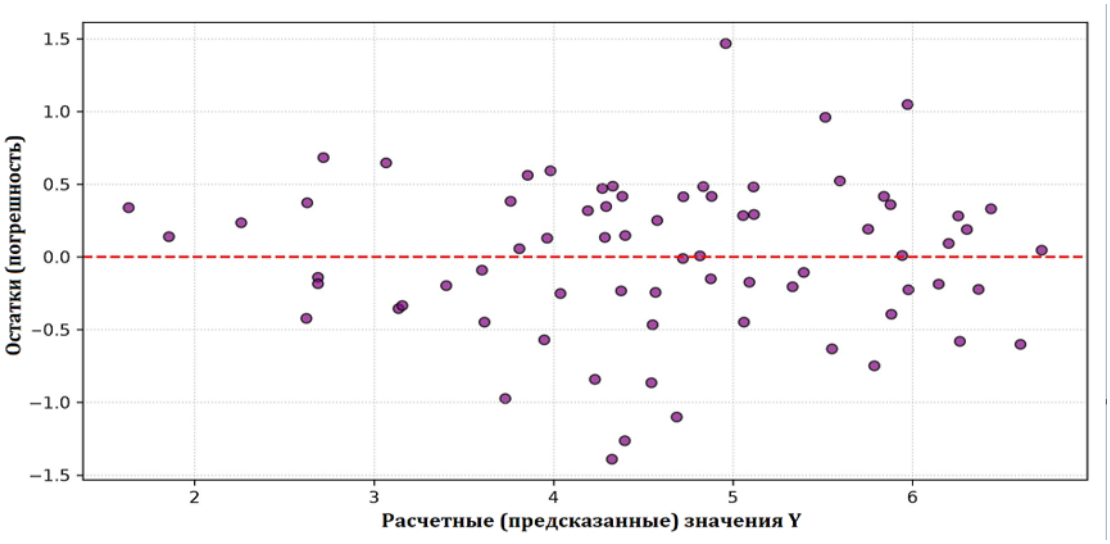


Рисунок 5 – Распределение остатков нелинейной регрессии по величине расчетных значений урожайности хлопка-сырца

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).

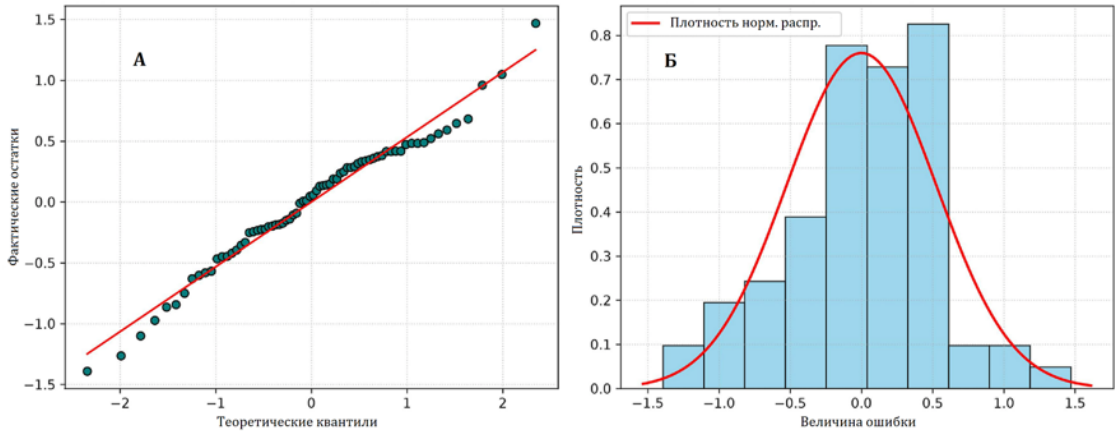


Рисунок 6 – Статистический анализ распределения ошибок аппроксимации: А) Квантильный график (Q-Q Plot); Б) Гистограмма плотности распределения остатков

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

IRSTI: 68.33.01

DOI: 10.51886/1999-740X_2026_4_74

K.H. Diri[1]*, R.H. Ramazanova[2], S.M. Kulzhanova[3], A.H. Mohamud[1], M. Mussakhan[1], O. Tate Joseph[4], J.B. Teknikio[5]

SOIL MICROBIAL RESPONSES FOLLOWING SULFONYLUREA HERBICIDE APPLICATION IN SEMI-ARID AGROECOSYSTEMS

[1]NJSC «Saken Seifullin Kazakh Agrotechnical University», 010011, Astana, Zhenis ave., 62, Kazakhstan

[2]LLP «U.U. Uspanov Kazakh Research Institute of Soil Science and Agrochemistry»,050060, Almaty, Al–Farabi ave., 75B, Kazakhstan

[3]Autonomous Educational Organization «Nazarbayev Intellectual Schools», 010000, Astana, Hussein ben Talal str., 21/1, Kazakhstan

[4]Institute for Environmental Sciences, University of Kaiserslautern-Landau (RPTU), D-76829,Landau in der Pfalz, Germany.

*[5]Federal University of Agriculture, Bassambiri (FUAB), P.M.B. 180, Yenagoa, Bayelsa State, Nigeria, *e-mail: kelvin.h.diri@kazatu.edu.kz*

Abstract. A field experiment on a southern carbonate chernozem under semi-arid conditions evaluated the effects of tribenuron-methyl and thifensulfuron-methyl on soil microbial and agrochemical properties. Soil samples were collected 10, 30, 50, and 70 days after application. Sampling date and the herbicide × sampling date interaction significantly affected soil microbial properties ($p<0.001$). Early declines in microbial biomass carbon and nitrogen were most pronounced under thifensulfuron-methyl, which also increased the microbial metabolic quotient (qCO_2) on some sampling dates. By day 70, microbial biomass carbon under tribenuron-methyl did not differ significantly from the untreated control, whereas it remained significantly lower under thifensulfuron-methyl. Available phosphorus varied considerably over time, while soil organic carbon and pH remained relatively stable. Changes in soil microbial properties depended on the herbicide active ingredient and time since application.

Keywords: sulfonylurea herbicides, tribenuron-methyl, thifensulfuron-methyl, soil microbial biomass, basal respiration, redundancy analysis.

INTRODUCTION

Wheat (Triticum aestivum L.) a cereal crop is cultivated over the largest global land area, on approximately 220-221 million hectares globally, with South Asia, the Middle East, North Africa, and Central and West Asia representing major wheat-growing regions [1], contributing substantially to global food and nutritional security. Wheat provides approximately 18% of global dietary calories and 19% of dietary protein, highlighting its importance as a major source of human nutrition [2-4]. However, wheat production in semi-arid environments is constrained by multiple abiotic stresses, including limited water availability, high temperatures, low soil organic matter, and poor soil fertility [5]. Improving wheat productivity while maintaining soil health is therefore essential for ensuring sustainable food production in these regions.

Among the major constraints to wheat production, weed infestation is an important biotic stress. Weeds compete with wheat for light, water, nutrients, and growing space, and the resulting yield loss depends on weed species, density, emergence time, duration of competition, crop competitiveness, and environmental conditions [6]. Weed infestation has been reported to reduce wheat grain yield by up to 40% under severe conditions in northern Kazakhstan. Field observations at Surayev

farm, originally documented by FAO and subsequently reported by Hickmann (2006), further highlight the extent of weed pressure under different seeding practices [7]. At the tillering stage, spring wheat grown after wheat under conventional seeding exhibited a total weed density of 124 plants m^{-2}, comprising 80 wild oat, 26 sow-thistle, and 18 other weed plants m^{-2}. In contrast, weed density under direct seeding at the same farm was 28 plants m^{-2}.

Consequently, the use of chemical control methods (herbicides) has become a widely adopted weed management strategy in modern wheat production systems because they provide effective and selective weed control while minimizing crop competition [8].

Despite their agronomic benefits, herbicides have raised concerns regarding their effects on non-target soil organisms and microbial functions. Herbicide exposure can alter the composition, abundance, and activity of soil microbial communities, with possible consequences for nutrient cycling and plant–soil interactions [9, 10].

Experimental studies have shown that some herbicides can alter soil microbial populations, soil organic-matter measurements, and dehydrogenase activity under specific soil and application conditions. These effects may be particularly relevant in semi-arid soils, where limited moisture can suppress microbial activity and slow biologically mediated herbicide degradation. Soil organic-matter content and mineral composition also influence herbicide sorption, bioavailability, mobility, and degradation, although the direction and magnitude of these effects depend on the herbicide's chemical properties and the characteristics of the soil [11, 12].

Soil biological health reflects the capacity of soil to sustain diverse and active microbial communities that contribute to organic matter decomposition, nutrient cycling, and the formation and maintenance of soil structure [13]. Common indicators of soil biological quality include soil microbial biomass carbon (MBC), microbial biomass nitrogen (MBN), soil organic carbon (SOC), and microbial CO_2 respiration. MBC and MBN quantify microbial biomass, whereas microbial CO_2 respiration provides an estimate of microbial metabolic activity; the ratio of MBC to SOC can additionally indicate the proportion of soil organic carbon contained in the microbial biomass [14, 15]. Hence, a decline in an indicator does not necessarily mean an equivalent decline in soil fertility or crop productivity; the relationship depends on nutrient availability, soil type, climate, crop management, and other factors. These indicators may respond to changes in soil management and agrochemical exposure, although their sensitivity and response time vary with soil properties, environmental conditions, and the compound applied. For example, Sulfonylurea (SU) herbicides have been evaluated for their effects on soil enzyme activity, including urease activity [16].

Persistent declines in microbial biomass or respiration may reduce nutrient-transforming capacity and contribute to reduced soil fertility, although effects on crop productivity should be evaluated using complementary chemical, biological, and plant-growth measurements.

The effects of sulfonylurea herbicides on soil microorganisms vary among herbicide compounds, application rates, soil properties, and environmental conditions. Previous studies have reported limited changes in the overall soil bacterial community one month after application of a formulated SU herbicide [17], whereas other studies have observed dose-, soil-, and time-dependent changes in respiration and microbial-community structure following triasulfuron treatment [18]. These findings indicate that microbial responses are not uniformly inhibitory and may change during herbicide dissipation. In semi-arid soils characterized by low organic-matter content and limited moisture, such responses may be particularly important because soil conditions can influence

microbial activity, herbicide bioavailability, and nutrient-transforming processes. However, the extent to which short-term microbial responses affect long-term soil fertility and wheat productivity remains insufficiently understood [19]. Although research on herbicide–soil microbiome interactions has increased, important knowledge gaps remain regarding the effects of SU herbicides on soil biological quality in semi-arid agroecosystems. In particular, relatively little information is available for dryland wheat systems with alkaline soils, low organic-matter content, and distinct microbial communities. Consequently, the responses of microbial biomass, soil organic carbon, enzyme activities, and their relationships with wheat productivity under these conditions remain poorly characterized.

Therefore, this study evaluated the effects of recommended application rates of Sulfonylurea herbicides on soil biological properties in a semi-arid agroecosystem. Specifically, the changes in microbial biomass carbon, microbial biomass nitrogen, microbial respiration, soil organic carbon, to improve understanding of sustainable herbicide management in semi-arid wheat production systems.

MATERIALS AND METHODS

The study was carried out during the 2025 growing season at the A.I. Barayev Grain Institute in Shortandy, Akmola Region, Northern Kazakhstan (51° 37′41″N, 71°02′14″E). The experimental site experiences a strongly continental climate, characterized by long, harsh winters, rapid spring warming, and moderately warm summers. Winter temperatures frequently drop below -20°C, while summer temperatures often rise above 30°C. Relative humidity is generally high during the winter months but decreases throughout the summer as evapotranspiration intensifies. Most precipitation occurs between April and August, aligning with the principal crop-growing season (figure 1).

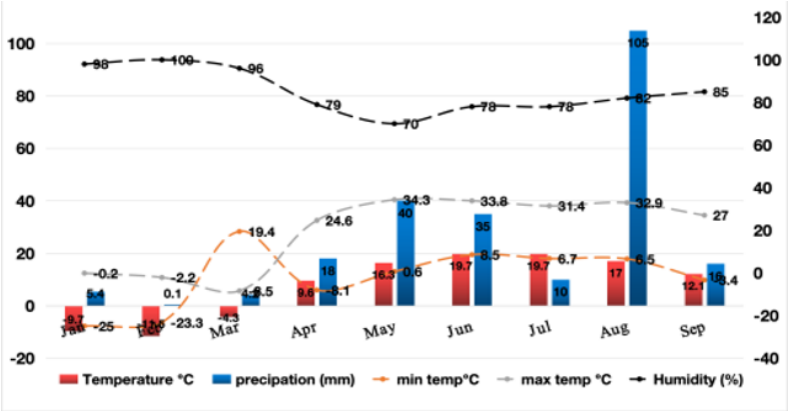


Figure 1 - Mean monthly Temperature and Rainfall data, A.I Barayev Grain Research Center, 2025. Source: www.kazhydromet.kz

During this period, the site received approximately 233.7 mm of rainfall, providing the primary source of moisture for crop growth despite its uneven temporal distribution

The soil at the experimental site was a southern carbonate chernozem with a pH (H_2O) of 8.11 and an organic carbon content of 2.6%. Available phosphorus was 21 mg kg^{-1}. Soil moisture content and temperature were 26% and 16°C, respectively. The soil was further classified as clay loam, with reported particle-size fractions of 18% sand, 47% silt, and 35% clay. The physiochemical properties characterize the soil conditions under with responses to Sulfonylurea herbicide application were evaluated.

Experimental Design and Treatment. The field experiment was established using a randomized complete block design (RCBD) to evaluate the effects of two commercial sulfonylurea herbicides on soil biological and physicochemical properties. The experiment comprised three treatments: Baron 750, containing 750 g kg^{-1} tribenuron-methyl (Alem Agro, Kazakhstan); Alcion, containing 750 g kg^{-1} thifensulfuron-methyl (Avgust, Russia); and an untreated control. Each treatment was replicated three times across three blocks, with each block containing one plot per treatment, resulting in nine experimental plots. Individual plots measured 4×10 m (40 m^2). Treatments were randomly allocated to plots within each block to minimize potential bias associated with spatial variability. Additionally, treatment (Herbicide) and sampling days, were fixed factors and their interaction (treatment × days) was used to determine treatment responses between sample time. Finally, block and experimental plot nested within block were included as random effect.

Spring wheat (Triticum aestivum L.), cultivar Taimas, was sown in mid-spring (15 May) using an LV-Service mechanical grain drill calibrated to a seeding rate of 260 viable seeds m^{-2} and a uniform sowing depth of 6 cm. Tribenuron-methyl and thifensulfuron-methyl were applied separately (24 May) at their recommended field application rates (table 2).

Table 2 – Herbicide treatments and application rates

Herbicide	Active ingredient	Field Dose	Active Ingredient
Alcion	Thifensulfuron-methyl 750 g/kg	15 g ha^{-1}	11.25g ha^{-1} a.i
Baron 750	Tribenuron-methyl 750 g/kg		

Herbicide applications were performed at the early tillering stage using a 10-L ha^{-1} knapsack sprayer equipped with a flat-fan nozzle and operated at a pressure of 2 bar. Control plots received no herbicide treatment, while all plots were maintained under otherwise identical agronomic management practices throughout the experimental period.

Soil sampling. Soil samples were randomly collected from three points 10, 30, 50 and 70 days after herbicide application. Within each replicated plot and thoroughly homogenized to form a single composite sample representing the 0-15 cm soil layer. A total of 36 composite soil samples were obtained across four sampling dates from three treatments and blocks. Subsamples collected within each plot were pooled and were not considered independent experimental replicates. The samples were further air-dried, ground, passed through a 2 mm sieve mesh, bagged, and stored for physiochemical analysis.

Separate fresh, field-moist soil samples collected was immediately incubated for 30 days at 25°C for microbial cumulative basal respiration, microbial biomass carbon (MBC) and microbial biomass nitrogen (MBN). Microbial biomass carbon and nitrogen were determined using chloroform fumigation-extraction (CFE) method following 24hours of alcohol-free chloroform fumigation.

Soil Analysis. The air-dried soil samples were analyzed for chemical properties: soil pH measured in water (1:2.5 w/v), available phosphorus measured according to GOST 26205-91 (Machigin), involving extraction with ammonium carbonate ($(NH_4)_2CO_3$) extracting solution, followed by colorimetric determination of phosphorus using the molybdenum blue. Soil organic Matter (SOC) was determined using the Walkley–Black wet oxidation method, followed by titration with $FeSO_4$. Soil Organic matter (SOM) was calculated by multiplying the percentage of organic carbon (Van Bemmelen factor) by 1.724.

20g of fresh soil (16.4g oven dry soil equivalent) with 21.9% moisture content was for soil cumulative basal respiration (C-CO_2) was analyzed via NaOH (Sodium hydroxide) trap and back titration with 0.25 M HCl during a 30-day laboratory incubation period [20]. The total amount of CO_2-C released over the incubation period was calculated and expressed as mg C–CO_2 kg^{-1} fresh soil.

Soil microbial biomass carbon, and Nitrogen (MBC and MBN) were analyzed by placing 7.5g fresh soil in a laboratory vacuum oven connected to an external vacuum pump and fumigated with ethanol-free chloroform (CFE) [21] for 24hours. Both fumigated and Non-fumigated samples were extracted with 0.5 M K_2SO_4. And analyzed using a Shimadzu TOC/TN analyzer [22].

Microbial biomass carbon (MBC) was determined from the difference in extractable organic carbon between chloroform-fumigated and non-fumigated soil samples, using a conversion factor of 2.64 (Eq. 1). Microbial biomass nitrogen (MBN) was calculated from the difference in extractable nitrogen between fumigated and non-fumigated samples, applying an extraction efficiency coefficient of 0.54 (Eq. 2).

$$MBC = 2.64 \times E_C \quad (1)$$

$$MBN = \frac{E_N}{0.54} \quad (2)$$

Microbial metabolic quotient (qCO_2) was further calculated by dividing basal respiration by MBC (Microbial biomass carbon). The formula is given as:

$$qCO2 = \frac{\text{Cummulative} - CO2}{t \times MBC}$$

Data Analysis. Soil measurements measured at 10, 30, 50, and 70 days after herbicide application were analyzed using a Linear mixed-effects model. Herbicide treatment, sampling time, and their interaction were specified as fixed effects, while replicate plot was included as a random effect to account for repeated measurements over time. Pairwise comparisons among estimated marginal treatment means were conducted using Tukey's honest significant difference (HSD) adjusted at the 5% significance level.

The model was given as;

$$Y_{ijk} = \mu + T_i + D_k + (T \times D)_{ik} + B_j + P_{ij} + e_{ikj} \quad (3)$$

where;

T = Herbicide treatment (fixed effect)

D = Sampling days

(T×D) = Herbicide treatment × Sampling days interaction.

B= block effect (random effect)

P= Experimental plot (random effect)

e = residual errror

Model residuals were evaluated for normality using the Shapiro-Wilk test, and homogeneity of variance was evaluated using Levene's test.

Redundancy analysis (RDA) was performed on standardized soil biological and chemical variables to evaluate the multivariate effects of herbicide treatment and sampling time on soil properties. RDA treatment effect were further evaluated using 216 restricted permutation, accounting for the randomized complete block design and repeated measurement by permuting the whole plots within blocks while controlling for sample date. All statistical analyses and visualizations were conducted in R using RStudio Version 2025.05.1+513.

RESULTS AND DISCUSSION

The analysis of variance showed significant effects of herbicide treatment, sampling time, and their interaction on available phosphorus, cumulative basal respiration, microbial biomass carbon and nitrogen, soil organic carbon, and the microbial metabolic quotient (p<0.001). Soil pH showed a different pattern: the overall effect of herbicide treatment was not significant (F=1.81, p=0.185), whereas sampling time (F=4.29, p=0.015) and the treatment×sampling-time interaction (p= 0.005) were significant (table 3). The significant interactions across all measured

parameters indicate that differences among treatments depended on the sampling date. Accordingly, treatment responses were examined separately at 10, 30, 50, and 70 days after herbicide application.

Table 3 – Analysis of variance of soil chemical properties, microbial biomass, and their responses to herbicide treatments

Parameters	Source	Df	F-value	P-value
AP	Herbicide	2	238.95	0.001
	Days	3	3061.25	0.001
	Herbicide x Day	6	89.02	0.001
C-CO_2	Herbicide	2	983.92	0.001
	Days	3	700.56	0.001
	Herbicide x Day	6	485.14	0.001
MBC	Herbicide	2	270.67	0.001
	Days	3	824.17	0.001
	Herbicide x Day	6	36.22	0.001
MBN	Herbicide	2	420.54	0.001
	Days	3	67.08	0.001
	Herbicide x Day	6	93.24	0.001
Org. C	Herbicide	2	10.32	0.001
	Days	3	20.32	0.001
	Herbicide x Day	6	8.32	0.001
pH	Herbicide	2	1.81	0.185
	Days	3	4.29	0.015
	Herbicide x Day	6	4.19	0.005
qCO_2	Herbicide	2	99.95	0.001
	Days	3	665.83	0.001
	Herbicide x Day	6	553.04	0.001

Soil acidity, Available phosphorus, and Organic carbon. Soil pH differed significantly among treatment × sampling date combinations (p<0.05); however, the magnitude of variation was relatively small, and pH remained broadly stable throughout the 70-day observation period (figure 2). At 10, 30, and 70 days after application, pH values were generally comparable among the control, tribenuron, and thifensulfuron-methyl treatments. At 50 days, soil pH under the thifensulfuron-methyl treatment was significantly lower than that of the control and tribenurontreatments. By 70 days, this difference was no longer evident, indicating that the transient pH response had not persisted until the final sampling date.

Plant-available phosphorus (AP) changed significantly over the sampling period, and the magnitude and direction of these changes differ among treatments (figure 2). At 10 days after herbicide application, AP concentrations were highest in the control and tribenuron-methyl treatments, whereas the thifensulfuron-methyl treatment had a significantly lower concentration. By 30 days, AP had declined substantially in all treatments. The control retained a significantly higher AP concentration than both herbicide treatments while the tribenuron-methyl and thifensulfuron-methyl treatments had similar concentrations of approximately 3 mg kg^{-1}.

At 50 days, AP in the tribenuron-methyl treatment increased to approximately 6 mg kg^{-1}, exceeding the concentrations measured in the control and thifensulfuron-methyl treatments. By 70 days, AP had declined again in all treatments. Both herbicide treatments remained significantly lower than the control, although the tribenuron-methyl treatment had a lower AP concentration than the thifensulfuron-

methyl treatment at this sampling time. Soil organic carbon (SOC) varied among the treatment×sampling-time combinations (figure 2).

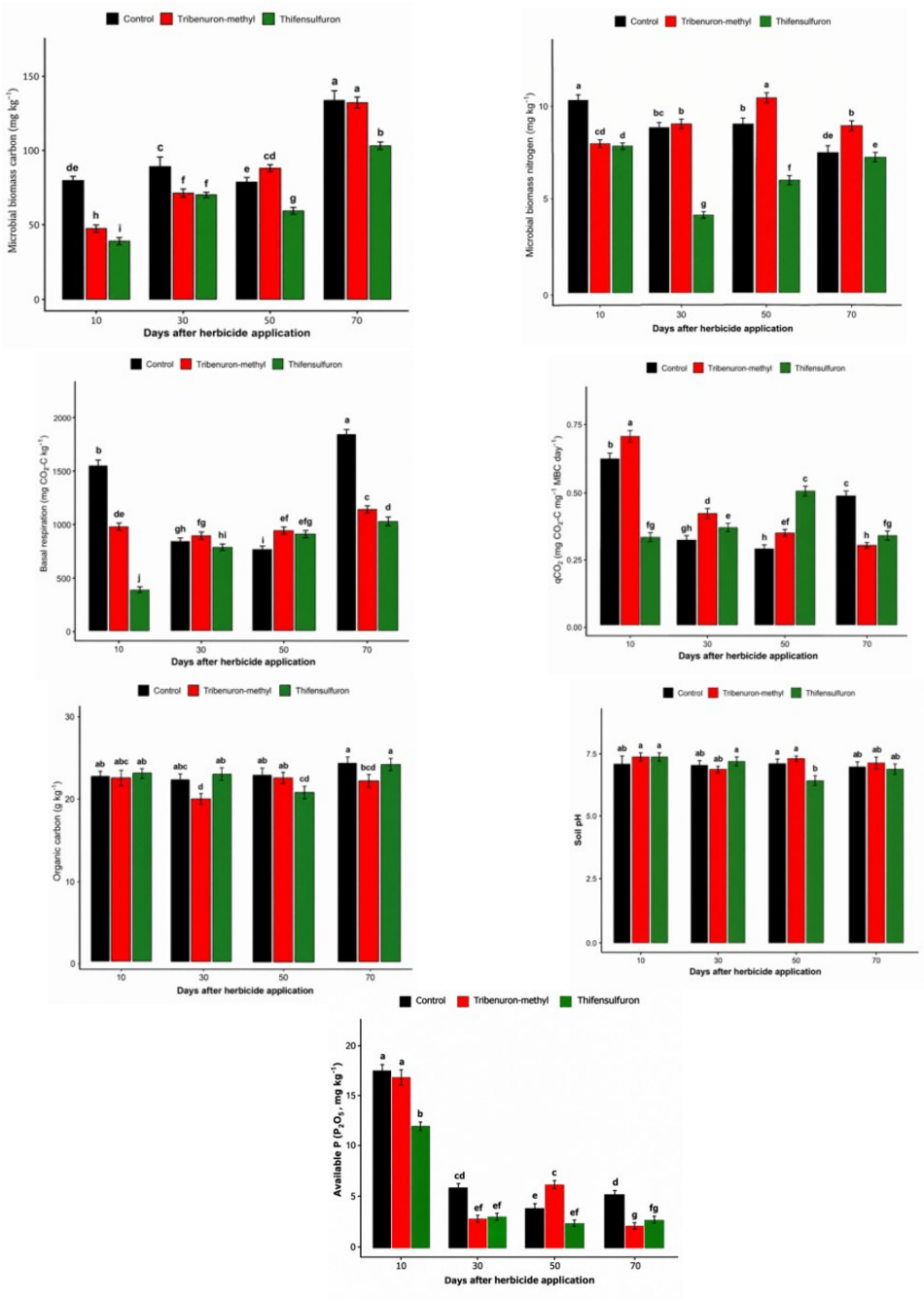


Figure 2 – Changes in soil microbial and chemical properties following application of tribenuron-methyl and thifensulfuron-methyl at 10, 30, 50, and 70 days after application: *(a) microbial biomass carbon, (b) microbial biomass nitrogen, (c) cumulative basal soil respiration, (d) metabolic quotient (qCO_2), (e) soil organic carbon, (f) soil pH, and (g) available phosphorus. Bars represent means ± standard error; whereas the different lowercase letters indicate significant differences among treatments × sampling time interaction (Tukey's test, p<0.05)*

At 30 days, SOC under tribenuron-methyl decreased to approximately 20 g kg^{-1} and was significantly lower than the corresponding control and thifensulfuron-methyl values. At 50 days, SOC under the control and tribenuron-methyl treatments was statistically comparable, whereas the thifensulfuron-methyl treatment had a significantly lower SOC concentration. At 70 days, SOC under thifensulfuron-methyl increased to approximately 24 g kg^{-1} and was statistically comparable with the control, whereas SOC under tribenuron-methyl was significantly lower than in the control. Because SOC is a relatively stable soil-carbon pool, these short-term fluctuations should be interpreted cautiously and should not be taken as evidence of sustained changes in soil carbon status.

Soil microbial biomass carbon, nitrogen, Basal respiration, and microbial metabolic quotient. Soil microbial biomass carbon (MBC) and nitrogen (MBN) varied significantly among herbicide treatments across sampling dates compared with the control (p<0.05; figure 2). Ten days after application, MBC was significantly lower under both tribenuron-methyl and thifensulfuron-methyl than in the control, with mean values of 48 and 38 mg kg^{-1}, respectively. MBN showed a similar early response, with the control recording the highest value and both herbicide treatments producing significantly lower concentrations.

Over the subsequent sampling period, MBC increased overall, although the temporal pattern differed between the two herbicides. Thirty days after application, both herbicide treatments remained significantly lower than the control. By day 50, MBC had increased under tribenuron-methyl but declined under thifensulfuron-methyl. At the final sampling date, MBC under tribenuron-methyl was statistically comparable with the control, whereas the thifensulfuron-methyl treatment remained significantly lower than both treatments.

MBN displayed a more pronounced treatment-dependent response. Its concentration under tribenuron-methyl at day 30 was comparable with the control, while thifensulfuron-methyl caused a marked decline and remained significantly lower than both treatments. The tribenuron-methyl treatment reached its highest MBN value at day 50, significantly exceeding the control and thifensulfuron-methyl treatments. Although MBN under thifensulfuron-methyl increased relative to day 30, it remained significantly lower than the other treatments. By day 70, MBN under tribenuron-methyl had declined but was still significantly higher than under thifensulfuron-methyl, while the control showed an intermediate response.

Overall, thifensulfuron-methyl produced lower MBC and MBN values than tribenuron-methyl at most sampling dates. By day 70, MBC under tribenuron-methyl was statistically comparable with the control, whereas MBC under thifensulfuron-methyl remained significantly lower than the control.

Basal respiration and the microbial metabolic quotient (qCO_2) varied significantly among herbicide treatments and sampling dates (p<0.05; figure 2).

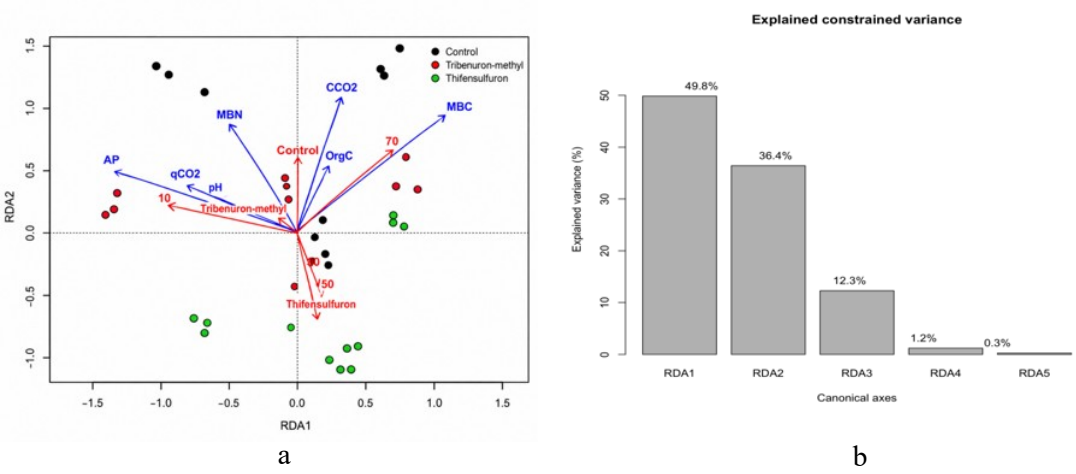
Basal respiration was highest in the control 10 days after application, whereas thifensulfuron-methyl produced the lowest value. Respiration under both herbicides increased during the observation period, whilst the magnitude and timing of the response differed between products. At 30 days, cumulative basal respiration was lower in the control than in both herbicide treatments, with tribenuron-methyl showing the highest value.

This pattern persisted at 50 days, when respiration under both herbicide treatments exceeded the control and the tribenuron-methyl treatment remained numerically highest. After 70 days, cumulative C–CO_2 respiration in the control had increased to approximately 1,100 and

1,000 mg C–CO_2 kg-1 for tribenuron-methyl and thifensulfuron-methyl, respectively.

The microbial metabolic quotient (qCO_2) also differed significantly among treatment x sampling-time combination (p<0.05). At 10 lays after application, qCO_2 was significantly higher under tribenuron-methyl than in the control, whereas thifensulfuron-methyl produced the lowest value. At the 30 days measurement, both herbicide treatments had higher qCO_2values than the control. The strongest response occurred at 50 days under thifensulfuron-methyl, which recorded the highest qCO_2, while the control had the lowest value. By the final sampling date, qCO_2 was recorded lowest under tribenuron-methyl, followed by thifensulfuron-methyl, whereas the control recorded the highest value.

RDA Analysis. Redundancy analysis (RDA) (figure 3) indicated that herbicide treatment and sampling time significantly influenced multivariate variation in the measured soil properties (F=8.75, p= 0.001), and explained 59.32% of the total variation (r^2=0.5932). The first two canonical axes were both highly significant (p=0.001) and explained 86.26% of the constrained variation, with RDA1 and RDA2 accounting for 49.85% and 36.41%, respectively (Table 4). RDA1 was positively associated mainly with microbial biomass carbon (MBC), cumulative C–CO_2 respiration, and soil organic carbon (SOC), whereas available phosphorus (AP), microbial metabolic quotient (*qCO2*), pH, and microbial biomass nitrogen (MBN) showed negative associations with this axis.



a b

Figure 3 – Redundancy analysis (RDA) of soil microbial and chemical properties under different herbicide treatments and sampling times: (a) RDA biplot showing the associations among treatments, sampling dates, and measured soil variables; (b) percentage of constrained variance explained by each canonical axis

RDA2 was positively associated with C-CO_2 respiration, MBC, and MBN. These associations indicate that the canonical axes represented contrasting patterns among microbial, carbon, phosphorus, and soil-acidity variables.

The ordination showed clear separation among the herbicide treatments and sampling times. Thifensulfuron-methyl observations were distributed mainly in the negative RDA2 region, whereas the control observations were more strongly associated with the positive RDA2 region.

Table 4 – Summary of redundancy analysis (RDA) axes showing eigenvalues, explained constrained variance, and cumulative variance

Axis	Eigenvalue	Canonical variance explained	Cumulative (%)
RDA1	2.0699	49.85	49.85
RDA2	1.5120	36.41	86.26

R^2 = 0.5932 (59.32%). Adjusted R^2 = 0.5254 (52.54%).

Tribenuron-methyl occupied a comparatively intermediate position, suggesting a less distinct overall multivariate response than thifensulfuron-methyl. Sampling time also contributed to the ordination pattern: where observations from10 and 70 days were positioned mainly toward the positive RDA2 region, while those from 30 and 50 days occurred more frequently toward the negative RDA2 region.

Table 5 – Restricted permutation test of overall treatment effect from partial redundancy analysis

Component	df	F value	P value	Significance
Treatment	2	6.6748	0.032	*
RDA1	1	10.6266	0.115	ns
RDA2	1	2.8138	0.115	ns

The results of the study indicates, that herbicide application significantly influenced soil biological properties, although the magnitude of the responses depended on herbicide type and time elapsed after application. Both MBC and MBN declined shortly after application, with the strongest early reductions mostly observed under thifensufuron. This pattern is consistent with previous reports of short-term changes in microbial biomass and nitrogen-related processes following sulfonylurea exposure. A study by El-Ghamry et al. [23] similarly reported reductions in microbial biomass C and N during the early stages following sulfonylurea herbicide application. Similarly, thifensulfuron-methyl has also been shown to affect soil microbial biomass and metabolic activity, although the magnitude of the response depends strongly on application rate, soil properties, and exposure conditions [24]. Furthermore, the significant short-term decline in MBC and MBN following herbicide application may reflect an initial disturbance of the soil microbial community. Interactions between herbicide molecules and soil organic matter can modify herbicide bioavailability, mobility, and thus influence their effects on soil microorganisms, potentially contributing to microbial responses [25].

The subsequent recovery of MBC and MBN during the later sampling period between 30 and 70 days suggests that the initial disturbance was temporary, potentially reflecting declining herbicide exposure and the reestablishment of microbial activity. However, this interpretation should be treated cautiously because herbicide residues, microbial community composition, substrate availability, soil moisture, and plant inputs were not measured simultaneously, additional measurements of herbicide dissipation, microbial community structure, and mineral nitrogen would be required to confirm the mechanism of recovery [26].

On the other hand, the temporally contrasting response of basal respiration and qCO_2 further indicates disturbance in microbial functioning. Changes in basal respiration may reflect altered microbial activity or substrate utilization rather than necessarily indicating a beneficial micro-

bial response. The increase in qCO_2 under thifensulfuron-methyl at specific sampling times suggests increased respiratory cost and possible physiological stress [27]. By 70 day, qCO_2 was lower under both herbicide treatments than in the control; however, this difference alone does not demonstrate complete recovery of microbial functioning. This is consistent with evidence that herbicide effects on soil microbial functioning can be short-term and depend on application rate and environmental conditions [28]. Temporal variation in AP, along with the relative stability of soil pH and SOC, suggests that herbicide effects occurred alongside broader changes in soil nutrient dynamics. This is particularly relevant for sulfonylureas, as their persistence and biological activity are strongly influenced by soil pH, SOC, and other soil properties [29].

Available phosphorus also varied over time and among treatments, whereas soil pH and SOC were comparatively stable. This pattern suggests that herbicide-related microbial responses occurred alongside broader temporal changes in nutrient dynamics rather than causing an immediate and sustained alteration of soil acidity or total organic-carbon status. The temporary changes in AP may reflect plant uptake, microbial immobilization and release, mineralization of organic phosphorus, or changes in phosphorus sorption and desorption. These mechanisms cannot be distinguished from the present data because phosphorus fractions, plant phosphorus uptake, and phosphatase activity were not measured. Sulfonylurea persistence and biological activity are strongly influenced by soil pH, SOC, moisture, temperature, and other soil properties.

The RDA integrated these responses and showed that herbicide treatment and sampling time were jointly associated with variation in the measured soil variable. The first canonical gradient was associated primarily with MBC, $C–CO_2$ respiration, and SOC, while AP, qCO_2, pH, and MBN contributed to the contrasting direction of the ordination. The second gradient was associated mainly with $C–CO_2$ respiration, MBC, and MBN. The separation of treatment groups and sampling times indicates that the relationships among soil biological and chemical variables changed dynamically during the post-application period rather than representing a uniform, persistent shift in soil fertility.

This is in tandem with evidence that sulfonylureas can alter soil microbial functioning in a time- and soil-dependent manner, with microbial and enzymatic responses varying substantially during the period following application [30].

The stronger separation of thifensulfuron-methyl observations from the control is consistent with the comparatively lower MBC and MBN values observed under that treatment at several sampling times. tribenuron-methyl occupied a more intermediate position, suggesting a less distinct or more variable multivariate response. Nevertheless, the RDA identifies associations among variables and treatments. This, however, does not by itself establish causal relationships. Sulfonylurea effects on soil microbial functioning and enzymic activities have likewise been shown to vary with time, soil type, herbicide identity, and application conditions. Further studies incorporating herbicide-residue dissipation, microbial community sequencing, enzyme activities, nutrient-transforming process, and wheat productivity would help to determine whether the observed short-term responses have longer-term consequences for soil biological quality.

CONCLUSION

The study investigated soil microbial responses to sulfonylurea herbicides, particularly tribenuron-methyl and thifensulfuron-methyl. Sulfonylurea herbicides caused temporal and herbicide-specific changes in soil microbial functioning, with more pronounced effects observed under thifensulfuron-methyl. By day 70, MBC under

tribenuron-methyl was statistically comparable with the control, whereas MBC under thifensulfurol-methyl remaind significantly lower. These results indicate that the duration of the microbial response differed between the two herbicides within the 70-day observation period. Redundancy analysis (RDA) further confirmed that treatment and sampling time jointly structured the soil response, highlighting microbial and nutrient-related properties as major components of this variation. However, herbicide residues were not directly quantified; therefore, the observed recovery cannot be conclusively attributed to herbicide dissipation. Future studies should combine herbicide residue analysis with longer-term monitoring of soil microbial responses to clarify the persistence and mechanisms of sulfonylurea effects under semi-arid conditions.

ACNOWLEDGEMENTS

This study was funded by the Ministry of Higher Education and Science of the Republic of Kazakhstan (Project AP23488514). The authors fully express their gratitude to the funding body for its support and acknowledge the contributions of all co-authors.

REFERENCES

1. Shiferaw B., Smale M., Braun H.-J., Duveiller E., Reynolds M., Muricho G. Crops that feed the world 10. Past successes and future challenges to the role played by wheat in global food security // Food Security. – 2013. – Vol. 5, No. 3. – P. 291–317.

2. Food and Agriculture Organization of the United Nations. FAOSTAT: Crops and livestock products – Rome : FAO, 2023. – URL: https://www.fao.org/faostat/ (date of access: 12.10.2026).

3. Erenstein O., Jaleta M., Mottaleb K. A., Sonder K., Donovan J., Braun H.-J. Global trends in wheat production, consumption and trade // Wheat Improvement: Food Security in a Changing Climate / ed. by M. P. Reynolds, H.-J. Braun. – Cham: Springer, 2022. – P. 47–66. – DOI: 10.1007/978-3-030-90673-3_4.

4. Ulukan H. Wheat production trends and research priorities: A global perspective // Advances in Wheat Breeding: Towards Climate Resilience and Nutrient Security / ed. by N. Zencirci et al. – Singapore: Springer, 2024. p1–22. – DOI: 10.1007/978-981-99-9478-6_1.

5. Alexandratos N., Bruinsma J. World agriculture towards 2030/2050: The 2012 revision. – Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2012.

6. Oerke E.-C., Dehne H.-W. Safeguarding production–losses in major crops and the role of crop protection // Crop Protection. – 2004. – Vol. 23, No. 4. – P. 275–285.

7. Hickmann S. Conservation agriculture in northern Kazakhstan and Mongolia. – Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2006. – (Agricultural and Food Engineering Working Document; No. 4).

8. Gianessi L. P., Reigner N. P. The value of herbicides in US crop production // Weed Technology. – 2007. – Vol. 21, No. 2. – P. 559–566.

9. Ruuskanen S.,Fuchs B., Nissinen R., Puigbò P., Rainio M.,Saikkonen K., Helander M. Ecosystem consequences of herbicides: The role of microbiome // Trends in Ecology & Evolution. – 2023. – Vol. 38, No. 1. – P. 35–43.

10. Sebiomo A., Ogundero V.W., Bankole S.A. Effect of four herbicides on microbial population, soil organic matter and dehydrogenase activity // African Journal of Biotechnology. – 2011. – Vol. 10, No. 5. – P. 770–778. – DOI: 10.5897/AJB10.989.

11. Kanissery R., Gairhe B., McAvoy C., Sims G. Herbicide bioavailability determinant processes in the soil // Journal of Bioremediation & Biodegradation. – 2019. – Vol. 10. – Article 458. – DOI: 10.4172/2155-6199.1000458.

12. Bollag J.-M., Liu S.-Y. Biological transformation processes of pesticides // Pesticides in the Soil Environment: Processes, Impacts, and Modeling / ed. by H. H. Cheng. – 1990. – DOI: 10.2136/sssabookser2.c6.

13. Doran J.W., Zeiss M.R. Soil health and sustainability: Managing the biotic component of soil quality // Applied Soil Ecology. – 2000. – Vol. 15, No. 1. – P. 3–11.

14. Anderson T.-H., Domsch K.H. Ratios of microbial biomass carbon to total organic carbon in arable soils // Soil Biology and Biochemistry. – 1989. – Vol. 21, No. 4. – P. 471–479.

15. Vance E.D., Brookes P.C., Jenkinson D.S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C // Soil Biology and Biochemistry. – 1987. – Vol. 19, No. 6. – P. 703–707.

16. Borozan A. B., Lalescu D. V., Mişcă C. D., Trofim A., Horablaga N. M., Bordean D. M., Popescu S., Manea D. N. Assessment of the soil urease response to sulfonylurea herbicides based on statistical models // Applied Ecology and Environmental Research. – 2020. – Vol. 18, No. 6. – P. 7573–7585. – DOI: 10.15666/aeer/1806_75737585.

17. Arabet D., Tempel S., Fons M., Denis Y., Jourlin-Castelli C., Armitano J., Redelberger D., Iobbi-Nivol C., Boulahrouf A., Méjean V. Effects of a sulfonylurea herbicide on the soil bacterial community // Environmental Science and Pollution Research. – 2014. – Vol. 21, No. 8. – P. 5619–5627. – DOI: 10.1007/s11356-014-2512-9.

18. Pose-Juan E., Igual J. M., Sánchez-Martín M. J., Rodríguez-Cruz M. S. Influence of herbicide triasulfuron on soil microbial community in an unamended soil and a soil amended with organic residues // Frontiers in Microbiology. – 2017. – Vol. 8. – P. 378.

19. Bezuglova O.S., Gorovtsov A.V., Polienko E.A., Zinchenko V.E., Grinko A.V., Lykhman V.A., Dubinina M.N., Demidov A. Effect of humic preparation on winter wheat productivity and rhizosphere microbial community under herbicide-induced stress // Journal of Soils and Sediments. – 2019. – Vol. 19, No. 6. – P. 2665–2675.

20. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Standard operating procedure for soil respiration rate. – Rome: FAO, 2023.

21. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Standard operating procedure for soil microbial biomass (carbon): Chloroform fumigation-extraction method. – Rome: FAO, 2024.

22. Van Midden C., Harris J., Shaw L., Sizmur T., Morgan H., Pawlett M. Immobilisation of anaerobic digestate supplied nitrogen into soil microbial biomass is dependent on lability of high organic carbon materials additives // Frontiers in Sustainable Food Systems. – 2024. – Vol. 8. – Art. 1356469. – DOI: 10.3389/fsufs.2024.1356469.

23. El-Ghamry A. M., Huang C. Y., Xu J. M. Combined effects of two sulfonylurea herbicides on soil microbial biomass and N-mineralization // Journal of Environmental Sciences. – 2001. – Vol. 13, No. 3. – P. 311–317.

24. Sofo A., Scopa A., Dumontet S., Mazzatura A., Pasquale V. Toxic effects of four sulphonylureas herbicides on soil microbial biomass // Journal of Environmental Science and Health, Part B. – 2012. – Vol. 47, No. 7. – P. 653–659. – DOI: 10.1080/03601234.2012.669205.

25. Jayamadhuri R., Rangaswamy V., Ramudu A. C., Jaffer Mohiddin G., Srinivasulu M. Influence of organophosphorus and carbamate insecticides on enzymatic activities of amylase, cellulase and invertase in two groundnut soils // Nature, Environment and Pollution Technology. – 2005. – Vol. 4. – P. 385–393.

26. Pertile M., Antunes J.E.L., Araujo F.F., Mendes L.W., Van den Brink P.J., Araujo A.S.F. Responses of soil microbial biomass and enzyme activity to herbicides imazethapyr and flumioxazin // Scientific Reports. – 2020. – Vol. 10. – Article 7694. – DOI: 10.1038/s41598-020-64648-3.

27. Pal R., Chakrabarti K., Chakraborty A., Chowdhury A. Degradation and effects of pesticides on soil microbiological parameters: A review // International Journal of Agricultural Research. – 2006. – Vol. 1. – P. 240–258. – DOI: 10.3923/ijar.2006.240.258.

28. Nguyen D.B., Rose M.T., Rose T.J., Morris S.G., Van Zwieten L. Impact of glyphosate on soil microbial biomass and respiration: A meta-analysis // Soil Biology and Biochemistry. – 2016. – Vol. 92. – P. 50–57. – DOI: 10.1016/j.soilbio.2015.09.014.

29. Grey T.L., McCullough P.E. Sulfonylurea herbicides' fate in soil: Dissipation, mobility, and other processes // Weed Technology. – 2012. – Vol. 26, No. 3. – P. 579–581. – DOI: 10.1614/WT-D-11-00168.1.

30. Medo J., Hricáková N., Maková J., Medová J., Omelka R., Javoreková S. Effects of sulfonylurea herbicides chlorsulfuron and sulfosulfuron on enzymatic activities and microbial communities in two agricultural soils // Environmental Science and Pollution Research. – 2020. – Vol. 27, No. 33. – P. 41265–41278. – DOI: 10.1007/s11356-020-10063-0.

ТҮЙІН

К. Х. Дири[1]*, Р. Х. Рамазанова[2], С. М. Құлжанова[3], А. Х. Мохамуд[1], М. Мұсахан[1], Дж. О. Тейт[4], Дж. Б. Техникио[4]

ЖАРТЫЛАЙ ҚУАҢ АГРОЭКОЖҮЙЕЛЕРДЕГІ ТОПЫРАҚ МИКРООРГАНИЗМДЕРІНІҢ СУЛЬФОНИЛМОЧЕВИНА ТОБЫНДАҒЫ ГЕРБИЦИДТЕРДІ ҚОЛДАНУҒА ЖАУАБЫ

[1]«Сәкен Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық университеті» КеАҚ, 010011, Астана, Жеңіс даңғылы, 62, Қазақстан

[2]«Ө. Ө. Оспанов атындағы Қазақ топырақтану және агрохимия ғылыми-зерттеу институты» ЖШС, 050060, Алматы, әл-Фараби даңғылы, 75Б, Қазақстан

[3]«Назарбаев Зияткерлік мектептері» дербес білім беру ұйымы, 010000, Астана, Хусейн бен Талал көшесі, 21/1, Қазақстан

[4]Қоршаған орта туралы ғылымдар институты, Кайзерслаутерн – Ландау университеті (RPTU), Ландау-ин-дер-Пфальц, D-76829, Германия

*[5]Бассамбиридегі федералдық ауыл шаруашылығы университеті (FUAB), P.M.B. 180, Йенагоа, Байелса штаты, Нигерия, *e-mail: kelvin.h.diri@kazatu.edu.kz*

Далалық тәжірибеде жартылай қуаң жағдайда оңтүстік карбонатты қара топырақтың микробиологиялық және агрохимиялық көрсеткіштеріне трибенурон-метил мен тифенсульфурон-метилдің әсері зерттелді. Топырақ үлгілері гербицидтерді қолданғаннан кейін 10, 30, 50 және 70-тәуліктерде алынды. Үлгі алу мерзімі және оның гербицид түрімен өзара әрекеттесуі микробиологиялық көрсеткіштерге статистикалық тұрғыдан елеулі әсер етті ($p<0,001$). Бақылаудың бастапқы кезеңінде микробтық биомассадағы көміртек пен азот мөлшерінің төмендеуі тифенсульфурон-метил қолданылған нұсқада айқынырақ байқалды. Осы нұсқада кейбір үлгі алу мерзімдерінде метаболизм коэффициенті (qCO_2) жоғарылады. 70-тәулікте трибенурон-метил қолданылған нұсқада микробтық биомасса көміртегінің мөлшері бақылау нұсқасынан статистикалық тұрғыдан ерекшеленбеді, ал тифенсульфурон-метил қолданылған нұсқада бақылаудан едәуір төмен болды. Сіңімді фосфор мөлшері уақыт бойынша едәуір өзгерді, ал топырақтағы органикалық көміртек мөлшері мен pH салыстырмалы түрде тұрақты болды. Микробиологиялық көрсеткіштердің өзгеруі гербицидтің әсер етуші затына және оны қолданғаннан кейінгі уақытқа байланысты болды.

Түйінді сөздер: сульфонилмочевина гербицидтері; трибенурон-метил, тифенсульфурон-метил, топырақтың микробтық биомассасы, базальды тыныс алу, редунданттық талдау.

РЕЗЮМЕ

К.Х. Дири[1]*, Р.Х. Рамазанова[2], С.М. Кулжанова[3], А.Х. Мохамуд[1], М. Муссахан[1], Дж.О. Тейт[4], Дж.Б. Техникио[4]

РЕАКЦИЯ ПОЧВЕННЫХ МИКРООРГАНИЗМОВ НА ПРИМЕНЕНИЕ ГЕРБИЦИДОВ ГРУППЫ СУЛЬФОНИЛМОЧЕВИН В ПОЛУЗАСУШЛИВЫХ АГРОЭКОСИСТЕМАХ

[1]НАО «Казахский агротехнический университет имени Сакена Сейфуллина», 010011, Астана, пр. Женис, 62, Казахстан

[2]ТОО «Казахский научно-исследовательский институт почвоведения и агрохимии имени У.У. Успанова», 050060, Алматы, пр. Аль-Фараби, 75Б, Казахстан

[3]Автономная организация образования «Назарбаев Интеллектуальные школы», 010000, Астана, ул. Хусейн бен Талал, 21/1, Казахстан

[4]Институт наук об окружающей среде, Университет Кайзерслаутерна – Ландау (RPTU), Ландау-ин-дер-Пфальц, D-76829, Германия

*[5]Федеральный сельскохозяйственный университет в Бассамбире (FUAB), P.M.B. 180, Йенагоа, штат Байелса, Нигерия, *e-mail: kelvin.h.diri@kazatu.edu.kz*

В полевом опыте на чернозёме южном карбонатном изучали влияние трибенурон-метила и тифенсульфурон-метила на микробиологические и агрохимические показатели почвы в полузасушливых условиях. Пробы отбирали на 10-е, 30-е, 50-е и 70-е сутки после обработки. Срок отбора и его взаимодействие с видом гербицида значимо влияли на микробиологические показатели ($p<0,001$). В первые сроки наблюдений снижение содержания углерода и азота микробной биомассы было наиболее выражено при применении тифенсульфурон-метила. В отдельные сроки в этом варианте повышался метаболический коэффициент (qCO_2). На 70-е сутки содержание углерода микробной биомассы в варианте с трибенурон-метилом статистически не отличалось от контроля, а в варианте с тифенсульфурон-метилом оставалось достоверно ниже. Содержание доступного фосфора заметно менялось, тогда как содержание органического углерода и pH почвы оставались относительно стабильными. Таким образом, изменения микробиологических показателей зависели от действующего вещества и срока после обработки.

Ключевые слова: сульфонилмочевинные гербициды, трибенурон-метил, тифенсульфурон-метил, микробная биомасса почвы, базальное дыхание, анализ избыточности (RDA).

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

1. Diri K. H. – Doctoral student, https://orcid.org/0000-0002-4203-0166, e-mail: kelvin.h.diri@kazatu.edu.kz

2. Ramazanova R.H. – Candidate's degree in agricultural sciences, associate professor, https://orcid.org/0000–0002–2059–709X, e-mail: raushasoil88@mail.ru

3. Kulzhanova S.M. – Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor, https://orcid.org/0000-0001-6662-886X, e-mail: bota-madi@mail.ru

4. Mohamud A.H. – Bachelors student, e-mail: Kuulaahmed@gmail.com

5. Mussakhan M. – Bachelor's student, https://orcid.org/0009-0000-8617-4789, e-mail: mussakhan.madina@gmail.com

6. Joseph O. Tate – Institute for Environmental Sciences, https://orcid.org/0000-0003-1386-963X, e-mail: tatejoseph123@gmail.com

7. Teknikio J.B. – Department of Soil Science, Federal University of Agriculture, https://orcid.org/0009-0006-1083-019X, e-mail: jemimahtknk@gmail.com

ҒТАМР 68.33.29
DOI: 10.51886/1999-740X_2026_4_89

А.Ж. Сманов[1]*, Т.А. Атақұлов[1]*, Н.А. Барлыкова[1], А.М. Тағаев[2]*, С. Махмаджанов[2], О. Дүйсен[2]

ОРГАНИКАЛЫҚ ТЫҢАЙТҚЫШТАРДЫҢ МАҚТА ЕГІСТІГІНДЕГІ ТОПЫРАҚ ҚҰНАРЛЫЛЫҒЫНА ЫҚПАЛЫ

*[1]Қазақ ұлттық аграрлық зерттеу университеті, 050010, Алматы, Абай даңғылы, 8, Қазақстан, *e-mail: sso-kz@mail.ru, atakulov44@mail.ru*

*[2]Қазақ мақта шаруашылығы ғылыми-зерттеу институты, 160525, Түркістан облысы, Атакент қалашығы, Лабораторная көшесі, 1а, Қазақстан,*e-mail: t.asanbai@mail.ru*

Аңдатпа. Бұл мақала органикалық тыңайтқыштарды қолданудың мақта егістігіндегі топырақ құнарлылығына және агрохимиялық қасиеттеріне әсерін кешенді бағалауға арналған. Зерттеудің негізгі мақсаты – органикалық тыңайтқыштарды пайдалану арқылы топырақтағы қарашірінді құрамы, қоректік элементтердің ($N\text{-}NO_3$, P_2O_5) өзгеруін анықтау болып табылады. Зерттеу жұмыстары суармалы егіншілік жағдайында жүргізілген далалық тәжірибелер негізінде орындалды. Тәжірибе барысында органикалық тыңайтқыштардың әртүрлі мөлшерде және әртүрлі қолдану тәсілдері бойынша топырақтың құнарлығына және қоректік режиміне әсері зерттелді. Зерттеу нәтижелері органикалық тыңайтқыштарды жүйелі қолдану топырақтағы органикалық заттар қорының артуына, қарашірік қабатының тұрақтануына және қоректік элементтердің өсімдікке сіңімділігінің жоғарылауына ықпал ететінін көрсетті. Сонымен қатар, органикалық тыңайтқыштарды пайдалану минералдық тыңайтқыштарға тәуелділікті азайтуға, топырақтың деградациялық үдерістерінің алдын алуға және агроэкожүйенің экологиялық тұрақтылығын сақтауға мүмкіндік беретіні анықталды. Зерттеу нәтижелері мақта шаруашылығындағы қорды үнемдейтін және экологиялық тұрғыдан қауіпсіз агротехнологияларды қалыптастырудың ғылыми негізін кеңейтеді және оларды өндірістік тәжірибеде енгізудің практикалық маңыздылығын дәлелдейді.

Түйінді сөздер: сұртопырақ, органикалық тыңайтқыштар, мақта, топырақ құнарлылығы, қарашірік, топырақтың нитратты азот $N\text{-}NO_3$ құрамы, топырақтың жылжымалы P_2O_5 құрамы.

КІРІСПЕ

Соңғы жылдары тек ғана минералдық тыңайтқыштарды шамадан тыс пайдалану, топырақтың табиғи қасиеттерінің бұзылуына, қоршаған ортаның ластануына және ауыл шаруашылығы өнімдерінің сапасының төмендеуіне әкеліп отыр. Осыған байланысты органикалық тыңайтқыштарды ауыл шаруашылығы өндірісіне кеңінен енгізу, топырақ құнарлылығын қалпына келтірудің және оны ұзақ мерзімге сақтаудың тиімді жолы ретінде қарастырылып отыр. Мақта дақылы суармалы егіншілік жүйесінде өсірілетін, топырақ құнарлылығына жоғары талап қоятын стратегиялық маңызы бар ауыл шаруашылығы дақылдарының бірі болып табылады. Бұл дақылдың тұрақты және жоғары өнім беруі, тікелей топырақтың қоректік режиміне, органикалық заттар мөлшеріне және су-физикалық қасиеттеріне байланысты болып келеді [1, 2].

Органикалық тыңайтқыштарды қолдану топырақ құрылымын жақсартып қана қоймай, қоректік элементтердің өсімдікке сіңімділігін арттырып, тамыр жүйесінің дамуын ынталандырады. Сонымен қатар, олар топырақтағы ылғал сақтау қабілетін күшейтіп, суармалы жағдайларда су ресурстарын тиімді пайдалануға мүмкіндік береді. Бұл факторлар мақта өсімдігінің физиологиялық белсенділігін арттырып, өнім

құрылымының қалыптасуына және өнім сапасының жоғарылауына оң әсерін тигізеді. Осыған байланысты органикалық тыңайтқыштардың мақта егістігіндегі топырақ құнарлылығына әсерін жан-жақты зерттеу, олардың агроэкологиялық және экономикалық тиімділігін бағалау, қазіргі ауыл шаруашылығы ғылымының маңызды бағыттарының бірі болып табылады [3, 4].

Қазір таңда топырақтың тұзденуының жағымсыз кері әсерлері көптеген елдерде байқалып отыр, яғни топырақтың тұздануы - топырақтың деградацияға ұшырауына әсер етіп, сонымен қатар қоршаған ортаға, адам денсаулығына, ауылшаруашылық өндірісі мен барлық дақылдардың өнімділігіне кері әсерін тигізіп, азық-түлік қауіпсіздігіне де қауіп төндіріп келеді [5, 6].

Топырақ сортаңдануының жағымсыз салдары, топырақтың агрофизикалық-биохимиялық қасиеттеріне және дақылдардың өсуі мен дамуына өте зиянды әсер етеді. Сортаң топырақтарда өсірілген ауылшаруашылығы дақылдары, қоректік заттардың жетіспеушілігін сезінеді, сондықтан да өсірушілер, химиялық минералды тыңайтқыштарды орнықты мөлшерден жоғары, яғни шектен тыс мөлшерде қолданады. Органикалық қоректік заттардың жетіспеушілігі топырақтың тұзденуының жанама әсері болып табылады және топырақтың сілтіленуі мен иондардың бәсекелестігінің нәтижесі болуы мүмкін. Сондықтан да топырақтың тұзденуы, топырақтың биологиялық белсенділігіне және ауыл шаруашылығы дақылдарының өнімділігіне айталықтай зиянын тигізеді [7, 8].

Шыңжаң мақта плантацияларының (ҚХР) тұзды топырақтарындағы тұрақты органикалық жетілдіру бойынша өте маңызды шешімдер қабылданғаны, зерттеу бағытына айналып отыр. Қолданыстағы зерттеулерде, фульвоқышқылына немесе аминқышқылдарына негізделген органикалық тыңайтқыштарды ерекше қолдану, топырақтың күйін айтарлықтай жақсартып, дақылдардың өнімділігі мен сапасын арттыра алатынын ғылыми тұрғыда көрсетілген [9, 10].

Органикалық қоспаларды химиялық тыңайтқыштармен бірге қолдану, дақылдарды өсірудегі тұрақтылықты қамтамасыз етудің және топырақтың құнарлылығын жақсартудың ең жақсы тәсілі ретінде танылды. Көң (FYM), жасыл тыңайтқыш (GM) немесе бидай немесе күріш сабаны (WS немесе RS) сияқты органикалық тыңайтқыштардың химиялық тыңайтқыштармен үйлесуі, өнімділікті тиімді арттырады, қоректік заттардың тепе-теңдігін жақсартады және топырақтағы органикалық көміртекті (SOC) және азот (N), фосфор (P), калий (K) және күкірт (S), сияқты макрэлементтерді көбейту арқылы топырақ құнарлылығын арттырады. Көптеген зерттеушілер органикалық тыңайтқыштар мен композттардың қоректік заттардың көзі және топырақты қалпына келтіру құралы ретіндегі рөлін атап өтті [11-13].

Мемлекет басшысы Қасым-Жомарт Тоқаевтың «Жасанды интеллект дәуіріндегі Қазақстан: өзекті мәселелер және оны түбегейлі цифрлық өзгерістер арқылы шешу» атты Қазақстан халқына Жолдауындағы маңызды міндеттерінің бірі - Ауыл шаруашылығын жаңа деңгейге көтеру қажет атап көрсетілген. Көптеген аймақта өндірістің барлық сатысын қамтитын үздік агрокәсіпорындар бар. Үздік агрокәсіпорындар ауыл шаруашылығы өнімін шығарудан бастап оны терең өңдеуге дейін тұтас өндірісті толығымен жолға қойып, зор табысқа жетіп отыр. Мұндай қадам инновациялар мен ғылыми жаңалықтарды ауыл шаруашылығында кеңінен қолдануға мүмкіндік береді. Жер – стратегиялық ресурс. Оның бар игілігі елді дамытып, халықтың тұрмысын жақсартуға арналуы керек деп атап көрсетті Президент [14].

Еліміздегі АӨК дамытудың 2021-2030 жылдарға арналған тұжырымдамасында, органикалық тыңайтқыштарды қолдану бойынша ерекше айтылып өткен. Топырақтың құнарлылығын сақтау жұмыстары бойынша қолданылатын минералды тыңайтқыштардың көлемі ғылыми негізделген нормалардың тек 23%-ін, ал органикалық тыңайтқыштар бойынша – тек ғана 1,2%-ін құрайды деп айтылған [15].

Сондықтан да сұр топырақтың екінші сортаңдану жағдайында, сортаңдану процестерін төмендету жолдарының бірі - жаңа буынның органикалық мелиоранттарын тиімді қолдану негізінде, мақта өсірудің қор үнемдейтін технологиясын өндіріске тереңендіру, өте өзекті мәселе болып отыр.

МАТЕРИАЛДАР МЕН ӘДІСТЕР

Зерттеу нысаны. Ғылыми жұмыстар 2024-2025 жылдар аралығында Қазақ мақта шаруашылығы ғылыми-зерттеу институттың эксперименталдық алқабында, зерттеудің негізгі нысаны ретінде суармалы жағдайда өсірілетін отандық Мақтаарал-5027 мақта сорты егістігіне қолданылған органикалық тыңайтқыштардың топырақ құнарлылығына, агрохимиялық көрсеткіштеріне және мақта өнімі мен сапасына әсерін зерттеу бойынша жұмыстары жүргізілді.

Тәжірибе қою әдістемесі. Жалпы ғылыми-зерттеу жұмыстары, суармалы жерлердегі алқаптық және вегетациялық тәжірибелер жүргізу әдістемесі бойынша жүргізілді. Статистикалық өңдеу әдістері бойынша есептеулері, зерттеу барысында алынған барлық эксперименттік деректер математикалық-статистикалық өңдеудеулер Б.А. Доспеховтың әдістемесі бойынша дайындалды. Орташа арифметикалық мән (M), стандарттық ауытқу (SD) және стандарттық қате (SE) есептелді. Нұсқалар арасындағы айырмашылықтардың сенімділігі дисперсиялық талдау (ANOVA) әдісі арқылы анықталды. Нәтижелердің статистикалық маңыздылығы $p<0,05$ деңгейінде бағаланды. Статистикалық есептеулер Microsoft Excel және Statistica бағдарламалық пакеттерін қолдану арқылы жүргізілді [16-18].

Топырақтың қарашірік құрамын анықтаулар, топырақтың 0-20, 20-40, 40-60см терең қабатынан, топырақ үлгілері алынып, зертханалық жағдайда Тюрин әдістемесі бойынша анықталды. Топырақтың нитратты азот - $N\text{-}NO_3$, Гранвальд-Ляжу бойынша коллориметриялық әдіспен, ал жылжымалы фосфор түрлері – P_2O_5, Мачигиннің әдістемесі бойынша көміртекті аммоний сығындысы әдісімен жүзеге асырылды.

Органикалық тыңайтқыштар, топырақты негізгі өңдеу алдында және егістен алдын чизелдеуден алдын енгізілді. Егіс алдындағы топырақ дайындау жұмыстары аймақтық агротехникалық талаптарға сәйкес жүргізілді.

Зерттеу барысында келесі тәжірибелік нұсқалар қарастырылды:

Нұсқа 1. Мақта өсірудің дәстүрлі технологиясы (органикалық мелиоранттар қолданылмайды).

Нұсқа 2. Органикалық мелиоранттар: Вермикомпост 2,5 т/га (күзде, жер жыртудан алдын) және 1,5 т/га (көктемде, топырақты қопсытудан алдын). Топырақ жақсартқышы-Soil conditioner 250 кг/га (күзде, жер жыртудан алдын) және 150 кг/га (көктемде егіс алды – топырақты чизелдеу алдын).

Нұсқа 3. Органикалық мелиоранттар: Вермикомпост 3,0 т/га (күзде, жер жыртудан алдын) және 1,0 т/га (көктемде, топырақты қопсытудан алдын). Топырақ жақсартқышы-Soil conditioner 300 кг/га (күзде, жер жыртудан алдын) және 100 кг/га (көктемде егіс алды – топырақты чизелдеу алдын).

Нұсқа 4. Органикалық мелиоранттар: Вермикомпост 3,5 т/га (күзде, жер жыртудан алдын) және 0,5 т/га (көктемде, топырақты қопсытудан алдын). Топырақ жақсартқышы-Soil con-

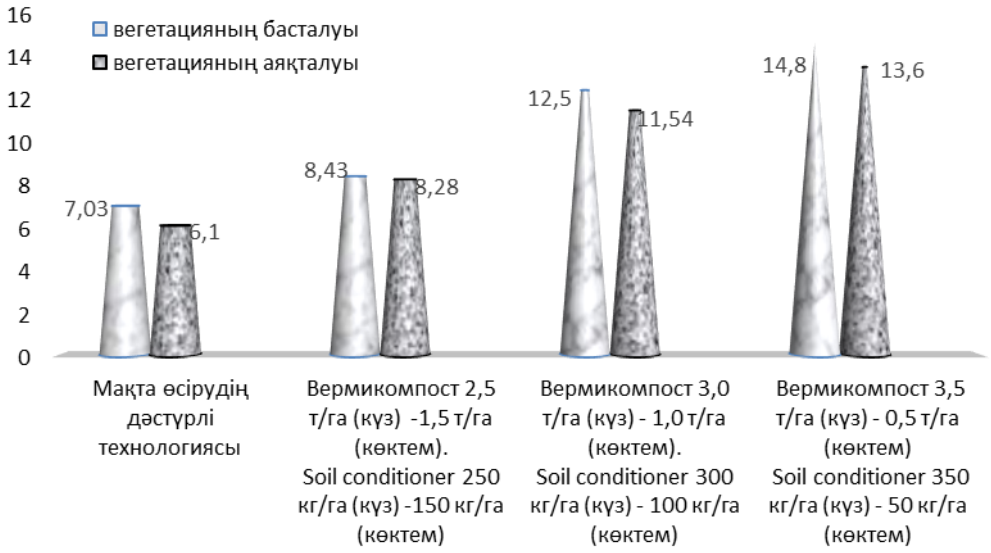
ditioner 350 кг/га (күзде, жер жыртудан алдын) және 50 кг/га (көктемде егіс алды – топырақты чизелдеу алдын).

НӘТИЖЕЛЕР ЖӘНЕ ОЛАРДЫ ТАЛҚЫЛАУ

Органикалық тыңайтқыштардың топырақтың агрохимиялық көрсеткіштеріне әсері. Жүргізілген зерттеу нәтижелері органикалық тыңайтқыштарды қолдану мақта егістігі жағдайында топырақтың агрохимиялық қасиеттеріне елеулі оң әсер ететінін көрсетті. Атап айтқанда, органикалық тыңайтқыштар топырақтағы қарашірік мөлшерінің артуына, негізгі қоректік элементтердің ($N\text{-}NO_3$, P_2O_5) жылжымалы түрлері құрамына оңтайлы ықпал етті.

Азот өсімдіктердің өсуі мен дамуы үшін негізгі қоректік элемент болып табылады және оның химиялық түрі тамырдың сіңу тиімділігіне және физиологиялық метаболизм жолдарына тікелей әсер етеді. Мысалы, мақта шаруашылығы үшін азоттың негізгі көзі болып табылатын түрі – ол нитратты азот ($N\text{-}NO_3$) [19].

Нәтижелер бойынша, мақта өсірудің дәстүрлі технологиясы жағдайында, (нұсқа 1) топырақтың нитратты азот $N\text{-}NO_3$ құрамының көрсеткіштері төмен болғаны анықталды. Мысалы, мақта өсірудің дәстүрлі технологиясы (органикалық тыңайтқыштар қолданылмаған) нұсқасы бойынша, топырақтың нитратты азот ($N\text{-}NO_3$) құрамы, вегетация басталғанда топырақтың 0-20 см қабатында 7,03 мг/кг, 20-40 см қабатта-4,25 мг/кг және 40-60 см қабатта – 2,90 мг/кг құрамында болса, ал вегетация аяқталғанда, бұл көрсеткіш сәйкесінше 0-20 см - 6,10 мг/кг, 20-40 см - 3,45 мг/ кг және 40-60 см топырақ қабатында - 2,50 мг/кг құрамда, яғни орнықты көр-сеткіштен төмен болғаны анықталды (сурет 1).



Сурет 1 - Органикалық тыңайтқышқарға байланысты топырақтың нитратты азоттың құрамының өзгеру динамикасы, мг/кг, 0-20 см

Кесте 1 - Органикалық тыңайтқыштардың топырақтың агрохимиялық көрсеткіштеріне әсері

Нұсқалар	қабат, см	$N\text{-}NO_3$		P_2O_5	
		Вегетация-ның басталуы	Вегетация-ның аяқталуы	Вегетация-ның басталуы	Вегетация-ның аяқталуы
Мақта өсірудің дәстүрлі технологиясы (органикалық мелиоранттар қолданылмайды)	0-20 20-40 40-60	7,03 4,25 2,90	6,10 3,45 2,50	11,7 10,3 5,3	9,3 8,6 4,3
Вермикомпост 2,5 т/га (жер жыртудан алдын) және 1,5 т/га (көктемде, қопсытудан алдын). Топырақ жақсартқышы-Soil conditioner 250 кг/га (жер жыртудан алдын) және 150 кг/га (көктемде- қопсытудан алдын)	0-20 20-40 40-60	8,43 4,55 4,40	8,28 4,25 4,10	18,2 15,0 8,2	14,7 13,2 6,1
Вермикомпост 3,0 т/га (жер жыртудан алдын) және 1,0 т/га (көктемде-қопсытудан алдын). Топырақ жақсартқышы-Soil conditioner 300 кг/га (жер жыртудан алдын) және 100 кг/га (көктемде-чизелдеу алдын)	0-20 20-40 40-60	12,50 6,10 5,60	11,54 5,63 5,16	23,6 17,1 8,55	18,5 15,0 7,8
Вермикомпост 3,5 т/га (жер жыртудан алдын) және 0,5 т/га (көктемде-чизелдеу алдын). Топырақ жақсартқышы-Soil conditioner 350 кг/га (жер жыртудан алдын) және 50 кг/га (көктемде-чизелдеу алдын)	0-20 20-40 40-60	14,8 9,5 6,7	13,6 8,44 5,79	25,1 20,7 9,65	20,0 16,4 8,5

Кесте 2 - Органикалық тыңайтқыштарды қолданудың топырақтағы органикалық заттар құрамына әсері, %

Нұсқалар	қабат, см	Қарашіріктің құрамы,%		Ауытқу, 0-60 см, %	
		Вегета-цияның басталуы	Вегета-цияның аяқталуы	Вегета-цияның басталуы	Вегета-цияның аяқталуы
Мақта өсірудің дәстүрлі технологиясы (органикалық мелиоранттар қолданылмайды)	0-20 20-40 40-60	0,754 0,713 0,414	0,750 0,706 0,402	±	±
Вермикомпост 2,5 т/га (жер жыртудан алдын) және 1,5 т/га (көктемде, қопсытудан алдын). Топырақ жақсартқышы-Soil conditioner 250 кг/га (жер жыртудан алдын) және 150 кг/га (көктемде- қопсытудан алдын)	0-20 20-40 40-60	0,790 0,738 0,428	0,779 0,726 0,406	3,8%	2,8%
Вермикомпост 3,0 т/га (жер жыртудан алдын) және 1,0 т/га (көктемде-қопсытудан алдын). Топырақ жақсартқышы-Soil conditioner 300 кг/га (жер жыртудан алдын) және 100 кг/га (көктемде-чизелдеу алдын)	0-20 20-40 40-60	0,810 0,750 0,448	0,780 0,732 0,428	6,2%	4,1%
Вермикомпост 3,5 т/га (жер жыртудан алдын) және 0,5 т/га (көктемде-чизелдеу алдын). Топырақ жақсартқышы-Soil conditioner 350 кг/га (жер жыртудан алдын) және 50 кг/га (көктемде-чизелдеу алдын)	0-20 20-40 40-60	0,842 0,769 0,442	0,822 0,750 0,420	8,3%	6,8%

Ал топырақтың $N\text{-}NO_3$ құрамының белсенді көрсеткіштері (нұсқа 4), вермикомпост 3,5 т/га (жер жыртудан алдын) және 0,5 т/га (көктемде-чизелдеу алдын) және үйлесімді топырақ жақсартқышы-Soil conditioner 350 кг/га (жер жыртудан алдын) және 50 кг/га (көктемде-чизелдеу алдын) мөлшерінде қолданғанда, топырақтың $N\text{-}NO_3$ құрамының көрсеткіштері едеуір артқаны анықталды. Мысалы, топырақтың 0-20 см қабатында 14,8 мг/кг, 20-40 см қабатта - 9,5 мг/кг және 40-60 см қабатта – 6,7 мг/кг құрамында болса, ал күзге қарай, бұл көрсеткіш сәйкесінше 0-20 см - 13,66 мг/кг, 20-40 см -8,44 мг/кг және 40-60 см топырақ қабатында - 5,79 мг/кг құрамда болды. Егер де топырақтың жоғары 0-20 см қабатын есепке алатын болсақ, онда салыстырмалы түрде $N\text{-}NO_3$ құрамы, бақылаулы органикалық тыңайтқыштар қолданылмаған нұсқасымен салыстырағанда, вегетация басталғанда 52,5%-ға артқаны бақыланды (сурет 1, кесте 1).

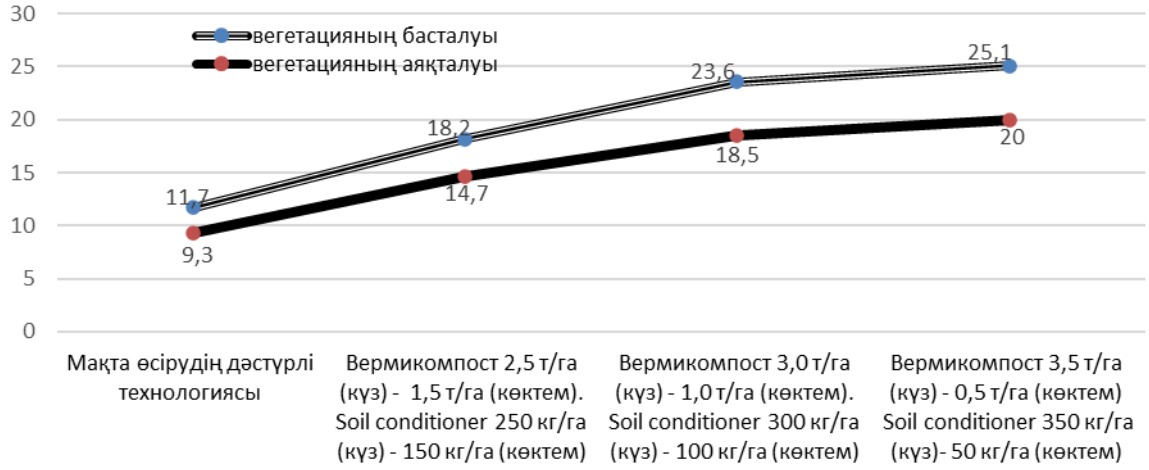
Ал фосфор (Р) метаболизм процестерінде, энергия тепе-теңдігін реттеуде, өсімдіктердің құрғақшылыққа төзімділігін арттыруда маңызды рөл атқарады және өсімдіктердің өсу қарқыны, дамуы және олардың өнімділігі де осы жылжымалы P_2O_5 элементтің құрамына байланысты болып келеді.

Фосфор (Р) - өсімдіктердің өсуі мен дамуы үшін өте маңызды, энергия өндірісі, нуклеин қышқылдарының синтезі, фотосинтез, мембраналардың синтезі мен тұрақтылығы және көмірсулар алмасуы сияқты әртүрлі процестерде шешуші рөл атқаратын маңызды қоректік элемент. Дүние жүзіндегі егістік алқаптардағы ауылшаруашылығы дақылдары, шамамен 30-40 пайызы фосфор тапшылығымен шектеліп отыр [20, 21].

Сондықтан да, зерттеу барысындағы топыраққа қолданылған органикалық тыңайтқыштар мен қарқынды агротехникалық жұмыстардың арқасында, топыраққа сіңімді фосфордың мөлшері едеуі артқаны анықталды. Біздің жұмысымыздағы оның маусымдық құрамдалуы бойынша нәтижелері, мақта өсірудің дәстүрлі технологиясымен салыстырғанда, айтарлықтай өзгергені анықталды. Мысалға алсақ, топырақтың жылжымалы P_2O_5 құрамының көрсеткіштері, мақта өсірудің дәстүрлі технологиясы жағдайында (нұсқа 1), төмен болғаны анықталды, себебі бұл нұсқада органикалық тыңайтқыштар қолданылмады. Топырақты талдау нәтижелері бойынша, топырақтың жылжымалы P_2O_5 құрамы, вегетация басталғанда топырақтың 0-20 см қабатында 11,7 мг/кг, 20-40 см қабатта -10,3 мг/кг және 40-60 см қабатта – 5,3 мг/кг құрамында болса, ал вегетация аяқталғанда, бұл көрсеткіштің төмендегені байқалды, яғни сәйкесінше 0-20 см -9,3 мг/кг, 20-40 см -8,6 мг/ кг және 40-60 см топырақ қабатында-4,3 мг/кг төмен құрамда болғаны анықталды (кесте 1).

Органикалық тыңайтқыштардың әртүрлі мөлшерін қолдануға байланысты топырақтың жылжымалы P_2O_5 құрамдарының қарқынды өзгергені айқындалды. Жылжымалы P_2O_5 құрамының жоғары көрсеткіштері (нұсқа 4), Вермикомпост 3,5 т/га (жер жыртудан алдын) және 0,5 т/га (көктемде-чизелдеу алдын) және үйлесімді топырақ жақсартқышы-Soil conditioner 350 кг/га (жер жыртудан алдын) және 50 кг/га (көктемде-чизелдеу алдын) мөлшерінде қолданғанда, жылжымалы P_2O_5 құрамы, вегетация басында топырақтың 0-20 см қабатында 25,1 мг/кг, 20-40 см - 20,7 мг/кг және 40-60 см қабатта – 9,65 мг/кг құрамда жоғары болса, ал күзге қарай, бұл көрсеткіш сәйкесінше 0-20 см - 20,0 мг/кг, 20-40 см - 16,4 мг/кг және 40-60 см қабатта - 8,5 мг/кг жоғары құрамда болғаны айқындалды. Мақтаның тамыр жайылатын 0-20 см топырақ қабаты бойынша мысал келтірсек, онда вегетация басында жылжымалы P_2O_5 құрамы

25,1 мг/кг құрады, яғни бақылаулы органикалық тыңайтқыштар қолданылмаған нұсқамен салыстырағанда 53,3%-ға жоғары құрамдалғаны айқындалды (сурет 2).



Сурет 2 - Топырақтың жылжымалы P_2O_5 құрамының органикалық тыңайтқышқарға байланысты өзгеру динамикасы, мг/кг, 0-20 см

Біздің зерттеулеріміздің негізгі міндеттерінің бірі органикалық тыңайтқыштарды қолдану негізінде сұртопырақтың құнарлылығына әсерін зерттеу болады.

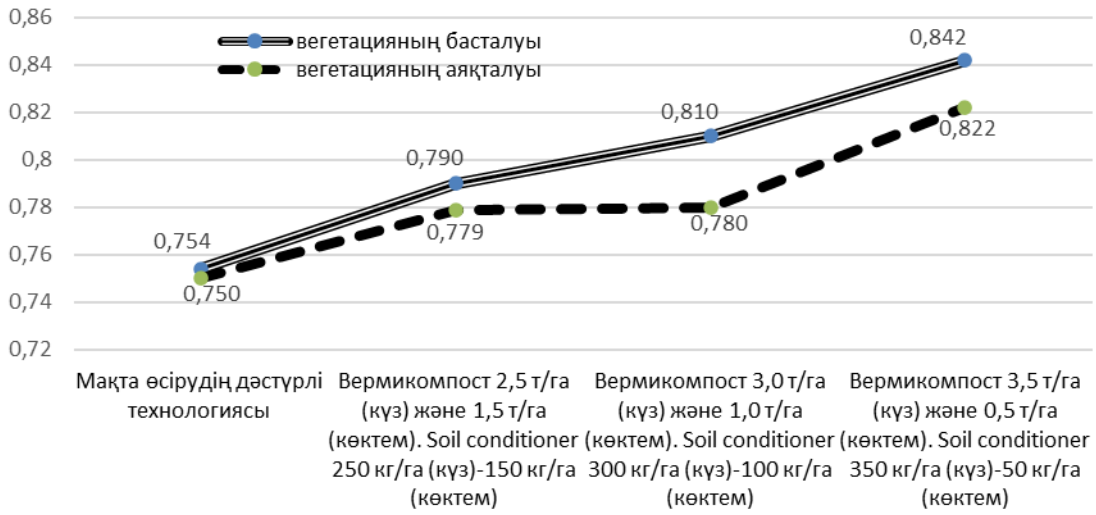
Зерттеу нәтижелері көрсеткендей, органикалық мелиоранттарды енгізу арқылы, сұртопырақтың құнарлылық көрсеткіштерінің өзгеруіне әсер еткені анықталды.

Зерттеу нәтижелері бойынша, органикалық тыңайтқыштар қолданылмаған мақта өсірудің дәстүрлі технологиясының нұсқасында, топырақтағы органикалық заттардың төмендеуі байқалды (бақылаулы нұсқа 1). Бұл нұсқадағы мақта дақылына, тек ғана азотты тыңайтқышты әсерлі зат есебінде 140 кг/га мөлшерінде қолданылды (400 кг/га физикалық салмақта). Мақта дақылы егілген егістіктегі топырақтың 0-20 см қабатында, органикалық заттар құрамы, вегетация басталуы мен аяқталуы да төмен құрамда болғаны анықталды. Вегетация басында оның мөлшері 0-20 см қабатында 0,754%, 20-40 см -0,713% болса, вегетациялық кезеңнің соңына қарай, 0-20 см қабатында 0,750%, 20-40 см - 0,706% төмен құрамда болғаны айқындалды (сурет 2).

Ал органикалық тыңайтқыштар қолданылған нұсқаларда, бақылаумен салыстырғандағы топырақтағы қарашірік құрамы едеуір жоғарылағаны байқалды. Топырақтағы қарашірік құрамы басқа нұсқаларға қарағанда төртінші нұсқада (нұсқа 4) жоғары екендігі анықталды. Топыраққа вермикомпостты 3,5 т/га (жер жыртудан алдын) және 0,5 т/га (көктемде-чизелдеу алдын) және үйлесімді топырақ жақсартқышы-Soil conditioner 350 кг/га (жер жыртудан алдын) және 50 кг/га (көктемде-чизелдеу алдын) мөлшерінде қолданғанда, қарашірік құрамы, басқа да органикалық тыңайтқыштардың әр түрлі мөлшерде қолданылған нұсқаларымен салыстырғанда, едеуір артқаны айқындалды. Талдау жұмыстары бойынша вегетация басында қарашіріктің құрамы, топырақтың 0-20 см қабатында 0,842%, 20-40 см қабатта 0,769% және 40-60 см

қабатта 0,442% болса, ал вегетация соңында, бұл көрсеткіш сәйкесінше 0-20 см – 0,822%, 20-40 см-0,750% және 40-60 см топырақ қабатында 0,420% құрамда болды (кесте 2).

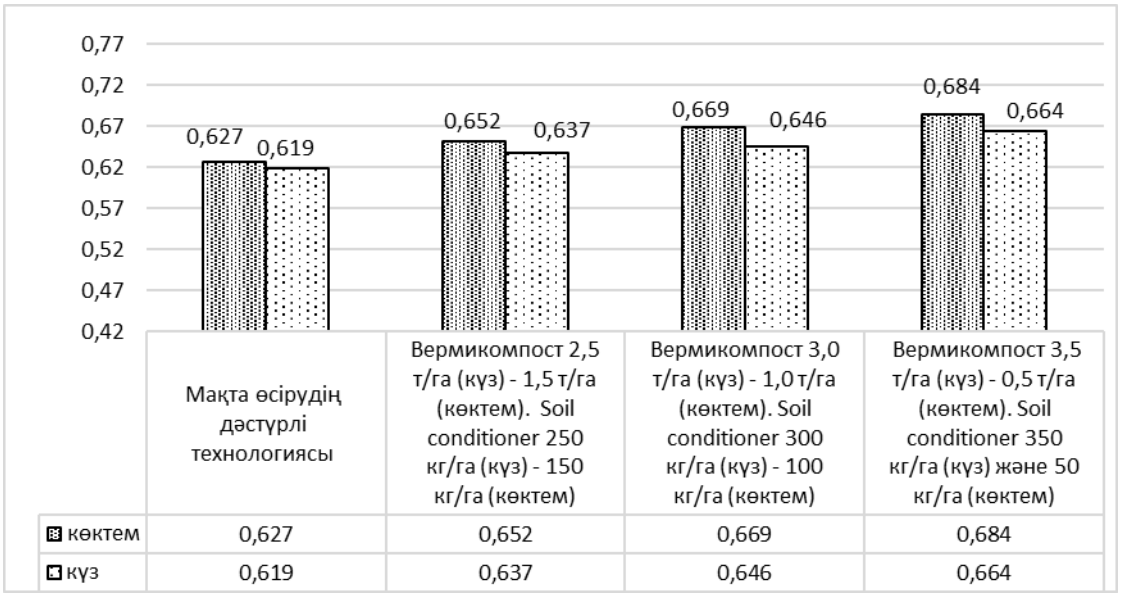
Екінші (0-20 см-0,790%) және үшінші нұсқалардағы (0-20 см-0,810%) органикалық заттар құрамы, төртінші нұсқамен салыстырғанда (0-20см-0,842%), топырақтың орташа 0-20 см қабаттағы органикалық заттар құрамы вегетация басында орташа есеппен 6,17 – 3,80%-ға төмен болса, ал бірақ, бақылау нұсқасымен (0-20 см - 0,754%) салыстырғанда 4,55-6,91%-ға жоғары құрамдалғаны анықталды (сурет 3).



Сурет 3 – Қарашірік құрамының өзгеру динамикасы, 0-20 см, %

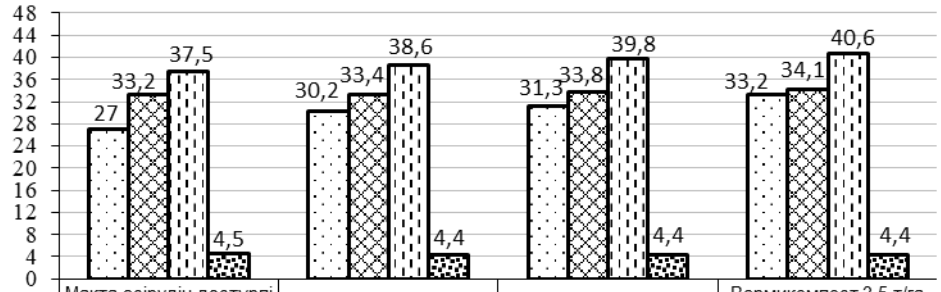
Жалпы төртінші нұсқа бойынша (нұсқа 4), топырақтың орташа 0-60 см қабаты бойынша, салыстырмалы түрде, вегетация басталғанда қарашірік құрамы, орташа есеппен 0,684% құрады, яғни бақылаулы органикалық тыңайтқыштар қолданылмаған нұсқамен салыстырғанда 8,33%-ға жоғары болғаны айқындалды (сурет 4).

Тәжірибе барысында органикалық тыңайтқыштардың мақта өнімділігі мен сапасына әсерін бақылау бойынша анықтаулар жүргізілді, мысалы органикалық тыңайтқыштар қолданылмаған, мақта өсірудің дәстүрлі технологиясы бойынша, мақтаның орташа өнімділігі 27,0 ц/га құрады. Ал жоғары мақта өнімділігі, басқа нұсқаларға қарағанда төртінші нұсқада (нұсқа 4), яғни топыраққа вермикомпостты 3,5 т/га (жер жыртудан алдын) және 0,5 т/га (көктемде-чизелдеу алдын) және үйлесімді топырақ жақсартқышы-Soil conditioner 350 кг/га (жер жыртудан алдын) және 50 кг/га (көктемде-чизелдеу алдын) мөлшерінде қолданғанда, мақта өнімділігі гектарына шаққанда 33,2 центнерге жетті, яғни органикалық тыңайтқыштар қолданылмаған бақылау нұсқамен салыстырғанда 6,2 центнерге артты (сурет 5).



	Мақта өсірудің дәстүрлі технологиясы	Вермикомпост 2,5 т/га (күз) - 1,5 т/га (көктем). Soil conditioner 250 кг/га (күз) - 150 кг/га (көктем)	Вермикомпост 3,0 т/га (күз) - 1,0 т/га (көктем). Soil conditioner 300 кг/га (күз) - 100 кг/га (көктем)	Вермикомпост 3,5 т/га (күз) - 0,5 т/га (көктем). Soil conditioner 350 кг/га (күз) және 50 кг/га (көктем)
көктем	0,627	0,652	0,669	0,684
күз	0,619	0,637	0,646	0,664

Сурет 4 – Топырақтың 0-60 см қабаттағы қарашіріктің өзгеру динамикасы,%



	Мақта өсірудің дәстүрлі технологиясы (органикалық мелиоранттар қолданылмайды)	Вермикомпост 2,5 т/га (күз) -1,5 т/га (көктем). Soil conditioner 250 кг/га (күз) -150 кг/га (көктем)	Вермикомпост 3,0 т/га (күз) - 1,0 т/га (көктем). Soil conditioner 300 кг/га (күз) - 100 кг/га (көктем)	Вермикомпост 3,5 т/га (күз) - 0,5 т/га (көктем) Soil conditioner 350 кг/га (күз) - 50 кг/га (көктем)
мақта өнімділігі, ц/га	27	30,2	31,3	33,2
талшық ұзындығы, мм	33,2	33,4	33,8	34,1
талшық шығымы, %	37,5	38,6	39,8	40,6
микронейр, mic	4,5	4,4	4,4	4,4

Сурет 5 – Органикалық тыңайтқыштардың мақта өнімділігі мен сапасына әсері

Мақтаның дақылының сапасына органикалық тыңайтқыштарды қолдануға байланысты қарқынды әсері де осы жұмыс барысында анықталды.

Зерттеу нәтижесінде, мақта өсірудің дәстүрлі технологиясында өсірілген Мақтаарал-5027 мақта сортының сапалық көрсеткіштері, органикалық тыңайтқыштар қолданылған нұсқалармен салыстырғанда орнықты дәрежеден төмен болғаны бақыланды, яғни мақта талшығының ұзындығы 33,2 мм, талшық шығымы 37,5%, ал микронейр (mic) 4,5 көрсеткіште болғаны айқындалды.

Ал мақта дақылының жоғары сапалық көрсеткіштері төртінші нұсқада, яғни топыраққа вермикомпостты 3,5 т/га (жер жыртудан алдын) және 0,5 т/га (көктемде-чизелдеу алдын) және үйлесімді топырақ жақсартқышы-Soil conditioner 350 кг/га (жер жыртудан

алдын) және 50 кг/га (көктемде-чизелдеу алдын) мөлшерінде қолданғанда, мақтаның сапалық көрсеткіштері жоғары екені сипатталды. Мысалы ретінде сипаттасақ, онда, мақта талшығының ұзындығы 34,1 мм, талшық шығымы 40,6%, ал микронейр (mic) 4,4 көрсеткіште болғаны айқындалды. Салыстырмалы түрде, бақылаулы органикалық тыңайтқыштар қолданылмаған, мақтаның дәстүрлі технологиясымен салыстырғанда, талшық ұзындығы мен талшық шығымы, сәйкесінше 2,6% және 7,6%-ға жоғары болды.

Жалпы алғанда, зерттеу барысында органикалық тыңайтқыштардың мақта егістігіндегі топырақтың агрохимиялық қасиеттері мен сапасын жақсартатыны анықталды. Органикалық тыңайтқыштардың ұзақ мерзімді әсері, топырақта тұрақты органикалық заттардың жиналуына және қоректік элементтердің тиімді айналымына жағдай жасайды. Бұл өз кезегінде минералдық тыңайтқыштарға тәуелділікті төмендетуге және экологиялық таза өнім өндіруге мүмкіндік береді. Осылайша, органикалық тыңайтқыштарды суармалы жағдайда мақта өсіру технологиясына енгізу, ауыл шаруашылығы өндірісінің экономикалық тиімділігін арттырудың және топырақ құнарлылығын сақтаудың маңызды бағыты болып табылады.

ҚОРЫТЫНДЫ

Органикалық тыңайтқыштарды қолдану негізінде, мақта егістігіндегі топырақтың қарашірік құрамы, нитратты азот $N\text{-}NO_3$, жылжымалы фосфор P_2O_5 құрамдары, органикалық тыңайтқыштар қолданылмаған егістікпен салыстырғанда, едеуір жоғарылағаны анықталды.

Органикалық тыңайтқыштарды қолдану суармалы егіншіліктің экологиялық тұрақтылығын арттыруға, топырақтың құнарлылығын сақтауға және минералдық тыңайтқыштарға тәуелділікті төмендетуге мүмкіндік береді. Бұл өз кезегінде экономикалық тиімділікті арттырып, экологиялық сапасы жоғары таза өнім алуға жағдай жасайды.

Зерттеу нәтижелері көрсеткендей, органикалық тыңайтқыштарды мақта өсіру технологиясына енгізу, топырақ құнарлылығын арттырудың және сапалы мақта өнімділігін тұрақты түрде жоғарылатудың тиімді құралы болып табылады. Бұл әдіс, әсіресе су тапшылығы байқалатын аймақтардағы мақта шаруашылығы өндірісінің ұзақ мерзімді тұрақтылығы мен өнімділігін қамтамасыз етуде маңызды болып табылады.

ҚАРЖЫЛАНДЫРУ

Зерттеу жұмыстары Қазақстан Республикасы Ауыл шаруашылығы министрлігінің қаржылық қолдауымен 2024-2026 жылдарға арналған «Қазақстанның әртүрлі топырақ және климат аймақтарында өзгермелі климат жағдайында үнемді ауылшаруашылық өндірісін қамтамасыз ететін тұрақты егіншілік жүйелерін әзірлеу және енгізу» BR22885719 ғылыми-техникалық бағдарламасы аясында орындалды.

ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Сманов Ә.Ж., Атақұлов Т.А. Қазақстанның оңтүстік-шығысында қорүнемдейтін инновациялық технологиялар негізінде суармалы жерлерді тиімді пайдалану: монография. - Алматы: «Полиграфия» баспаханасы, 2025. - № 13(4). - Б. 9–32.

2. Сманов Ә.Ж., Жанбырбаев Е.А., Барлықова Н.Ә. Агрономиялық зерттеу негіздері: оқу құралы. - Алматы: «Айтұмар» баспасы, 2024. - Б. 6–159.

3. Сманов А.Ж., Атақұлов Т.А., Тағаев А.М. Құрғақ аймақ жағдайында су үнемдеу технологияларын қолдану. Жәңгір хан атындағы Батыс Қазақстан

аграрлық-техникалық университетінің «Ғылым және білім» ғылыми-практикалық журналы. - 2025. - № 4-3 (81). - Б. 34–44. - ISSN 2305-9397. - DOI: 10.52578/2305-9397-2025-4-3-34-44.

4. Тагаев А.М., Толеков А.С., Сманов А.Ж. Способы повышения эффективности орошаемых земель // Ізденістер, нәтижелер – Исследования, результаты. - 2025. - № 1 (105). - С. 490–497. - ISSN 2304-3334. - DOI: 10.37884/1-2025/52.

5. Arora S., Singh A.K., Singh Y.P. Bioremediation of Salt Affected Soils: An Indian Perspective. - Cham: Springer International Publishing, 2017. - DOI: 10.1007/978-3-319-48257-6.

6. Diacono M., Montemurro F. Effectiveness of organic wastes as fertilizers and amendments in salt-affected soils // Agriculture. - 2015. - Vol. 5. - P. 221–230.

7. Morsy S., Elbasyoni I.S., Baenziger S., Abdallah A.M. Gypsum amendment influences performance and mineral absorption in wheat cultivars grown in normal and saline-sodic soils // Journal of Agronomy and Crop Science. - 2022. - № 2. - P. 1–18.

8. Mahmoodabadi M., Yazdanpanah N., Sinobas L.R., Pazira E., Neshat A. Reclamation of calcareous saline sodic soil with different amendments (I): Redistribution of soluble cations within the soil profile // Agricultural Water Management. - 2013. - Vol. 120. - P. 30–38.

9. Jiang W., Chen R., Lyu J., Qin L., Wang G., Chen X., Wang Y., Yin C., Mao Z. Remediation of the microecological environment of heavy metal-contaminated soil with fulvic acid improves the quality and yield of apple // Journal of Hazardous Materials. - 2023. - Vol. 460. - P. 132399. - DOI: 10.1016/j.jhazmat.2023.132399.

10. Jin Q., Zhang Y., Wang Q., Li M., Sun H., Liu N., Zhang L., Zhang Y., Liu Z. Effects of potassium fulvic acid and potassium humate on microbial biodiversity in bulk soil and rhizosphere soil of Panax ginseng // Microbiological Research. - 2022. - Vol. 254. - P. 126914. - DOI: 10.1016/j.micres.2021.126914.

11. Islam M.M., Karim A.J.M.S., Jahiruddin M., Majid N.M., Miah M.G., Ahmed M.M. Effects of organic manure and chemical fertilizers on crops in the radish-stem amaranth-Indian spinach cropping pattern in homestead area // Australian Journal of Crop Science. - 2011. - Vol. 5, № 11. - P. 1370–1378.

12. Sood M.C. Integrated nutrient supply and management for potato production in mid hills of Shimla // Potato Journal. - 2007. - Vol. 34, № 1–2. - P. 101–102.

13. Heitkamp F., Raupp J., Ludwig B. Soil organic matter pools and crop yields as affected by the rate of farmyard manure and use of biodynamic preparations in a sandy soil // Organic Agriculture. - 2011. - Vol. 1, № 2. - P. 111–124.

14. Мемлекет басшысы Қасым-Жомарт Тоқаевтың «Жасанды интеллект дәуіріндегі Қазақстан: өзекті мәселелер және оны түбегейлі цифрлық өзгерістер арқылы шешу» атты Қазақстан халқына Жолдауы. - Астана, 2025. - 8 қыркүйек.

15. Қазақстан Республикасының агроөнеркәсіптік кешенін дамытудың 2021–2030 жылдарға арналған тұжырымдамасы. Қазақстан Республикасы Үкіметінің 2021 жылғы 30 желтоқсандағы № 960 қаулысы. - Астана, 2021.

16. Методика полевых и вегетационных опытов с хлопчатником. - 4-е изд., доп. - Ташкент: Союз НИХИ, 1981. - С. 10–218.

17. Доспехов, Б. А. Методика полевого опыта: (с основами статистической обработки результатов исследований). – М.: ИД Альянс. 2011. – 352 с.

18. Snedecor G.W., Cochran W.G. Statistical Methods. - 8th ed. - Ames: Iowa State University Press, 1989. - P. 210–235.

19. O'Brien A., Vega A., Bouguyon E., Krouk G., Gojon A., Coruzzi G., Gutiérrez R.A. Nitrate transport, sensing, and responses in plants // Molecular Plant. - 2016. - Vol. 9, № 6. - P. 837–856. - DOI: 10.1016/j.molp.2016.05.004.

20. Bieleski R.L. Phosphate pools, phosphate transport, and phosphate availability // Annual Review of Plant Physiology. - 1973. - Vol. 24, № 1. - P. 225–252.

21. Dey G., Banerjee P., Sharma R.K., Maity J.P., Etesami H., Shaw A.K., Chen C.Y. Management of phosphorus in salinity-stressed agriculture for sustainable crop production by salt-tolerant phosphate-solubilizing bacteria – A review // Agronomy. - 2021. - Vol. 11, № 8. - P. 1552. - DOI: 10.3390/agronomy11081552.

REFERENCES

1. Smanov A.Zh., Atakulov T.A. Kazakhstannyn ontustik-shygysynda korunemdeitin innovaciyalyk tekhnologiyalar negizinde suarmaly zherlerdi tiimdi paidalanu. - Almaty: «Poligrafiya» baspahanasy, 2025. - - № 13(4). - B. 9–32.

2. Smanov A.Zh., Zhanbyrbaev E.A., Barlykova N.A. Agronomiyalyk zertteu negizderi. - Almaty: «Aitumar» baspasy, 2024. - B. 6–159.

3. Smanov A.Zh., Atakulov T.A., Tagaev A.M. Kurgak aimak zhaғdaiynda su unemdeu tekhnologiyalaryn koldanu // Zhangir han atyndagy Batys Kazakhstan agrarlyk-tekhnikalyk universitetinin «Gylym zhane bilim» gylymi-praktikalyk zhurnaly. - 2025. - № 4-3 (81). - B. 34–44. - ISSN 2305-9397. - DOI: 10.52578/2305-9397-2025-4-3-34-44.

4. Tagaev A.M., Tolekov A.S., Smanov A.Zh. Sposoby povysheniya effektivnosti oroshaemyh zemel' // Izdenister, natizheler – Issledovaniya, rezul'taty. - 2025. - № 1 (105). - S. 490–497. - ISSN 2304-3334. - DOI: 10.37884/1-2025/52.

5. Arora S., Singh A.K., Singh Y.P. Bioremediation of Salt Affected Soils: An Indian Perspective. - Cham: Springer International Publishing, 2017. - DOI: 10.1007/978-3-319-48257-6.

6. Diacono M., Montemurro F. Effectiveness of organic wastes as fertilizers and amendments in salt-affected soils // Agriculture. - 2015. - Vol. 5. - P. 221–230.

7. Morsy S., Elbasyoni I.S., Baenziger S., Abdallah A.M. Gypsum amendment influences performance and mineral absorption in wheat cultivars grown in normal and saline-sodic soils // Journal of Agronomy and Crop Science. - 2022. - № 2. - P. 1–18.

8. Mahmoodabadi M., Yazdanpanah N., Sinobas L.R., Pazira E., Neshat A. Reclamation of calcareous saline sodic soil with different amendments (I): Redistribution of soluble cations within the soil profile // Agricultural Water Management. - 2013. - Vol. 120. - P. 30–38.

9. Jiang W., Chen R., Lyu J., Qin L., Wang G., Chen X., Wang Y., Yin C., Mao Z. Remediation of the microecological environment of heavy metal-contaminated soil with fulvic acid improves the quality and yield of apple // Journal of Hazardous Materials. - 2023. - Vol. 460. - P. 132399. - DOI: 10.1016/j.jhazmat.2023.132399.

10. Jin Q., Zhang Y., Wang Q., Li M., Sun H., Liu N., Zhang L., Zhang Y., Liu Z. Effects of potassium fulvic acid and potassium humate on microbial biodiversity in bulk soil and rhizosphere soil of Panax ginseng // Microbiological Research. - 2022. - Vol. 254. - P. 126914. - DOI: 10.1016/j.micres.2021.126914.

11. Islam M.M., Karim A.J.M.S., Jahiruddin M., Majid N.M., Miah M.G., Ahmed M.M. Effects of organic manure and chemical fertilizers on crops in the radish-stem amaranth-Indian spinach cropping pattern in homestead area // Australian Journal of Crop Science.

- 2011. - Vol. 5, № 11. - P. 1370–1378.

12. Sood M.C. Integrated nutrient supply and management for potato production in mid hills of Shimla // Potato Journal. - 2007. - Vol. 34, № 1–2. - P. 101–102.

13. Heitkamp F., Raupp J., Ludwig B. Soil organic matter pools and crop yields as affected by the rate of farmyard manure and use of biodynamic preparations in a sandy soil // Organic Agriculture. - 2011. - Vol. 1, № 2. - P. 111–124.

14. Memleket basshysy Kasym-Zhomart Tokaevtyn «Zhasandy intellekt dauirindegi Kazakhstan: ozekti maseleler zhane ony tubegeili cifrlyk ozgerister arkyly sheshu» atty Kazakhstan halkyna Zholdauy. - Astana, 2025. - 8 kyrkuyek.

15. Kazakhstan Respublikasynyn agroonerкasiptik keshenin damytudyn 2021–2030 zhyldarga arnalgan tuzhyrymdamasy. Kazakhstan Respublikasy Ukimetinin 2021 zhylgy 30 zheltoksandagy № 960 kaulysy. - Astana, 2021.

16. Metodika polevyh i vegetacionnyh opytov s hlopchatnikom. - 4-e izd., dop. - Tashkent: Soyuz NIHI, 1981. - S. 10–218.

17. Dospekhov B.A. Metodika polevogo opyta: s osnovami statisticheskoj obrabotki rezul'tatov issledovanij. - M.: ID Al'yans, 2011. - 352 s.

18. Snedecor G.W., Cochran W.G. Statistical Methods. - 8th ed. - Ames: Iowa State University Press, 1989. - P. 210–235.

19. O'Brien A., Vega A., Bouguyon E., Krouk G., Gojon A., Coruzzi G., Gutiérrez R.A. Nitrate transport, sensing, and responses in plants // Molecular Plant. - 2016. - Vol. 9, № 6. - P. 837–856. - DOI: 10.1016/j.molp.2016.05.004.

20. Bieleski R.L. Phosphate pools, phosphate transport, and phosphate availability // Annual Review of Plant Physiology. - 1973. - Vol. 24, № 1. - P. 225–252.

21. Dey G., Banerjee P., Sharma R.K., Maity J.P., Etesami H., Shaw A.K., Chen C.Y. Management of phosphorus in salinity-stressed agriculture for sustainable crop production by salt-tolerant phosphate-solubilizing bacteria – A review // Agronomy. - 2021. - Vol. 11, № 8. - P. 1552. - DOI: 10.3390/agronomy11081552.

РЕЗЮМЕ

А.Ж. Сманов[1]*, Т.А. Атақұлов[1]*, Н.А. Барлыкова[1], А.М. Тагаев[2]*,
С. Махмаджанов[2], О. Дүйсен[2]

ВЛИЯНИЕ ОРГАНИЧЕСКИХ УДОБРЕНИЙ НА ПЛОДОРОДИЕ ПОЧВЫ ХЛОПЧАТНИКА

*[1]Казахский аграрный исследовательский университет, 050010, Алматы, пр. Абая, 8, Казақстан, *e-mail: sso-kz@mail.ru: atakulov44@mail.ru*

*[2]Казахский научно-исследовательский институт хлопководства, 160525, Атакент, ул. Лабораторная, 1а, Туркестанская область, Казахстан, *e-mail: t.asanbai@mail.ru*

Данная статья посвящена комплексной оценке влияния применения органических удобрений на плодородие и агрохимические свойства почв под хлопчатником. Основной целью исследования является определение изменения содержания гумуса в почве, питательных элементов ($N\text{-}NO_3$, P_2O_5) с использованием органических удобрений. Исследовательские работы были выполнены на основе полевых экспериментов, проведенных в условиях орошаемого земледелия. В ходе эксперимента изучалось влияние органических удобрений на плодородие и питательный режим почвы в различных количествах и при различных способах применения. Результаты исследования показали, что систематическое внесение органических удобрений способствует увеличению запасов органических веществ в почве, стабилизации гумусового слоя и повышению усвояемости питательных элементов растением. Кроме того, установлено, что использование органических

удобрений позволяет снизить зависимость от минеральных удобрений, предотвратить процессы деградации почв и сохранить экологическую устойчивость агроэкосистемы. Результаты исследования расширяют научную основу формирования ресурсосберегающих и экологически безопасных агротехнологий в хлопководстве и доказывают практическую значимость их внедрения в производственной практике.

Ключевые слова: серозем, органические удобрения, хлопчатник, плодородие почвы, гумус, нитратный азот $N\text{-}NO_3$, подвижные формы фосфора P_2O_5.

SUMMARY

A.Zh. Smanov[1]*, T.A. Atakulov[1]*, N.A. Barlykova1, A.M. Tagaev[2]*,
S. Makhmadzhanov[2], O. Duysen[2]

EFFECT OF ORGANIC FERTILIZERS ON THE FERTILITY OF COTTON SOILS

*[1]Kazakh National Agrarian Research University, 050010, Almaty, Abay Ave., 8, Kazakhstan, *e-mail: sso-kz@mail.ru, atakulov44@mail.ru*

*[2]Kazakh Research Institute of Cotton Growing, 160525, Atakent, 1a, Laboratory Str., Kazakhstan, *e-mail: t.asanbai@mail.ru*

This article is devoted to a comprehensive assessment of the impact of the use of organic fertilizers on the fertility and agrochemical properties of cotton soils. The main objective of the study is to determine the changes in the humus content of the soil and the availability of nutrients ($N\text{-}NO_3$, P_2O_5) using organic fertilizers. The research was conducted based on field experiments conducted under conditions of irrigated agriculture. During the experiment, the impact of organic fertilizers on soil fertility and nutrient availability was studied in different quantities and application methods. The study results showed that the systematic application of organic fertilizers increases the soil's organic matter reserves, stabilizes the humus layer, and improves the plant's nutrient uptake. In addition, it has been established that the use of organic fertilizers reduces dependence on mineral fertilizers, prevents soil degradation processes, and maintains the ecological sustainability of the agroecosystem. The research results expand the scientific basis for the development of resource-saving and environmentally friendly agricultural technologies in cotton production and demonstrate the practical significance of their implementation in production practices.

Keywords: gray soil, organic fertilizers, cotton, soil fertility, humus, Nitrate nitrogen $N\text{-}NO_3$, mobile forms of P_2O_5 phosphorus.

АВТОРЛАР ТУРАЛЫ МӘЛІМЕТ

1. Сманов Аширали Жусипович - «Агрономия, селекция және биотехнология» кафедрасының аға оқытушысы, PhD, https://orcid.org/0000-0001-7468-575X, e-mail: sso-kz@mail.ru

2. Атақұлов Тастанбек Атақұлұлы - ауылшаруашылығы ғылымдарының докторы, https://orcid.org/0000-0001-7831-5262, e-mail: atakulov44@mail.ru

3. Барлыкова Нурлыхан Адилхановна - «Агрономия, селекция және биотехнология» кафедрасының ассистенті, https://orcid.org/0009-0004-2068-9914, e-mail: nurmereke@mail.ru

4. Тагаев Асанбай Мамадалиевич - ауыл шаруашылығы ғылымдарының кандидаты, бөлім меңгерушісі, https://orcid.org/0000-0002-5590-1776, e-mail: t.asanbai@mail.ru

5. Махмаджанов Сабир Партович - ауыл шаруашылығы ғылымдарының кандидаты, бөлім меңгерушісі, https://orcid.org/0000-0001-5623-0591, e-mail: max_s1969@ mail.ru

6. Дүйсен Оразхан Калдибекұлы - кіші ғылыми қызметкер, магистр, https://orcid.org/0000-0001-6571-7641, e-mail: Orazkhan-pro@mail.ru

ОБЗОРНАЯ СТАТЬЯ

SISTI: 68.03.43; 68.33.29

DOI: 10.51886/1999-740X_2026_4_104

A.I.Suleimenova[1,2]*, M.N.Poshanov[1], A.S. Vyrakhmanova[1]

FROM MECHANISMS TO FIELD APPLICATION: A SYSTEMATIC REVIEW OF SILICON-MEDIATED SALINITY TOLERANCE IN PLANTS

[1]Kazakh Research Institute of Soil Science and Agrochemistry named after U.U. Uspanov, 050060, Almaty, Al-Farabi avenue, 75B, Kazakhstan

[2]Kazakh National Agrarian Research University, 050010, Almaty, Abai Ave., 8, Kazakhstan, e-mail: s.altynai87@mail.ru

Abstract. The study was conducted in accordance with the PRISMA 2020 guidelines. Two complementary searches of the Scopus database identified 746 scientific records, of which 378 studies were included in the analysis after removal of duplicates and assessment against the predefined eligibility criteria. The analysis of the scientific literature showed that silicon-mediated enhancement of plant salinity tolerance is primarily associated with improved regulation of Na^+ ions, stabilization of the K^+/Na^+ ratio, reduction of oxidative damage, maintenance of photosynthesis and water status, as well as recovery of plant growth and biomass. Both conventional silicon sources and silicon nanoparticles can be effective under specific conditions. However, due to the limited number of studies directly comparing these forms, there is insufficient evidence to confirm the overall superiority of nano-silicon over other forms of silicon. Most studies were conducted under controlled conditions, whereas field studies accounted for only 4.6% of the total. Future research should prioritize standardized reporting of silicon doses, direct comparisons of different silicon sources and application methods, investigation of genotype-specific responses, and field experiments conducted across multiple locations and growing seasons. Overall, silicon represents a promising but context-dependent component of salinity management and should not be considered a universally effective solution across all conditions.

Keywords: silicon, salinity stress, salt tolerance, ion homeostasis, oxidative stress, silicon nanoparticles, crop productivity, saline soils, systematic review.

INTRODUCTION

Soil salinity is one of the major factors limiting plant growth and crop productivity. This constraint is particularly pronounced in arid and semi-arid regions, where high evapotranspiration, poor drainage, and saline irrigation contribute to salt accumulation in the root zone [1]. Salinity induces osmotic, ionic, and oxidative stress: reduced water potential restricts water uptake, while excessive accumulation of Na^+ and Cl^- disrupts mineral nutrition and ion homeostasis [2]. As a result, cell membranes are damaged, photosynthesis is impaired, the production of reactive oxygen species (ROS) increases, and plant growth and productivity decline. The severity of these effects varies depending on plant species, genotype, developmental stage, and growing conditions [3-5].

Silicon (Si) has received increasing attention in recent years due to its ability to alleviate salinity stress [6]. Studies have shown that Si can reduce Na^+ accumulation and transport, maintain K^+ uptake and the K^+/Na^+ ratio, mitigate oxidative damage, and improve plant water relations and photosynthetic performance [7-11]. Silicon has been shown to enhance the activity of proton pumps involved in ion homeostasis in aloe [8], affect the expression of the Si transporters Lsi1 and Lsi2 in rice [12], alter the expression of salt-responsive genes in tomato [13], and be associated with changes in DNA methylation in oat [14]. Thus, Si-mediated salinity tolerance involves interacting physiological, biochemical,

and molecular processes. Plant responses to Si vary depending on plant species and genotype, Si source and dose, application method, salinity conditions, developmental stage, and experimental system [5,14,15-19]. Most of the available evidence is derived from controlled NaCl experiments and does not fully represent the conditions of heterogeneous salt-affected soils. In cotton, the effectiveness of Si has been lower under alkaline stress, while field-based evidence remains limited [16].

This systematic review examines how plant species and genotype, salinity type and severity, Si source and dose, application method, developmental stage, and experimental system influence Si-mediated salinity tolerance. The synthesis covers ion homeostasis, oxidative and antioxidant responses, water relations, photosynthesis, growth, productivity, and molecular regulation. We hypothesize that the effectiveness of Si is context dependent and is determined by interactions among plant characteristics, Si treatment, salinity conditions, and the experimental environment.

MATERIALS AND METHODS

Review Design and Search Strategy. This systematic review followed the PRISMA 2020 guidelines [20] and a predefined review protocol [21]. The review examined experimental evidence on Si-mediated plant responses to salinity, with emphasis on the mechanisms involved, sources of variation in Si effectiveness, and translation of physiological responses to growth and yield.

Literature was searched in Scopus using the TITLE-ABS-KEY fields. Two complementary searches were used to capture both general studies of Si-mediated salinity tolerance and studies focused on major physiological and biochemical mechanisms. The searches covered publications from 1992 to 2026 and retrieved 364 and 382 records, respectively. The complete search strings are provided in table 1. Records from both searches were merged and duplicates removed before screening. The final search was conducted on 25 August 2026.

Table 1 - Keyword Combinations and Boolean Syntax Used in the Two-Stage Scopus Search

Database	Search stage	Conceptual dimension	Search terms
Scopus	Stage 1	General Si-mediated salinity tolerance	silicon AND (“salt stress” OR salinity) AND (“plant tolerance" OR “salinity tolerance” OR “salt tolerance”)
	Stage 2	Physiological and biochemical mechanisms	silicon AND (“salt stress” OR salinity) AND plant* AND (“ion homeostasis” OR “Na+/K+” OR “K+/Na+” OR "sodium uptake” OR “oxidative stress" OR “antioxidant defense” OR “osmotic adjustment” OR photosynthesis)

Note: Searches were conducted in the Scopus TITLE-ABS-KEY fields. Records from both searches were merged and deduplicated before screening.

Eligibility and Study Selection. Original experimental articles were eligible if they evaluated Si application under salinity and reported plant responses relevant to salinity tolerance. Studies were excluded if they lacked an experimental Si treatment, did not assess Si-mediated responses, investigated non-Si amendments or stresses other than salinity, or lacked relevant plant responses. Combined treatments were included only when Si-specific effects could be distinguished from those of other

treatments. Where available, comparisons were made between salt-stressed plants treated with Si and corresponding plants without Si.The searches identified 746 records. After removing 181 duplicates, 565 records were screened by title and abstract, with 43 excluded. Of 522 reports assessed for full-text eligibility, eight could not be retrieved and 136 of the remaining 514 articles were excluded. Thus, 378 articles were included in the final synthesis (figure 1). Each article was treated as the primary unit of inclusion, while multiple treatments, genotypes, salinity levels, and experimental conditions within an article were recorded as study characteristics rather than separate publications.

Bibliometric Analysis. Bibliometric analysis was performed using VOSviewer [22] to examine keyword co-occurrence and temporal changes in research themes. Network visualization was used to identify relationships among frequently occurring keywords, while overlay visualization showed changes in their average publication year. Node size represented keyword occurrence frequency, link strength represented co-occurrence, and overlay color indicated the average publication year.

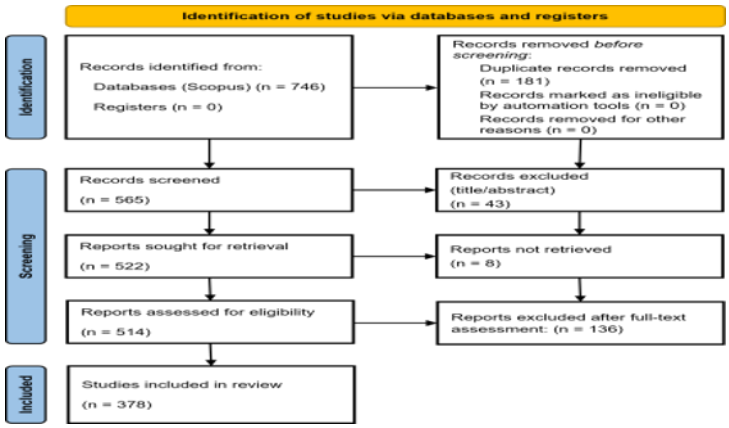


Figure 1 - PRISMA 2020 flow diagram of study identification, screening, eligibility assessment, and inclusion in the systematic review of silicon-mediated salinity tolerance in plants

RESULTS AND DISCUSSION

Bibliometric Characteristics of Research on Silicon-Mediated Salinity Tolerance. Temporal Dynamics of Publications and Citation Impact. Publication activity increased markedly after 2014-2015 and exceeded 40 records in 2025; 2026 data are partial to 25 August. The field has shifted from early work on growth and ion relations toward oxidative regulation, photosynthesis, molecular mechanisms, Si nanomaterials, and application strategies [23-26]. (figure 2).

Keyword Network and Evolution of Research Themes. The author-keyword network was centered on silicon, salinity, and salt stress, with major clusters related to ion homeostasis, oxidative and antioxidant responses, photosynthesis, water relations, osmotic adjustment, and plant growth (figure 3). The close links among ionic regulation, oxidative defense, photosynthesis, water status, and growth support the view that Si-mediated salinity tolerance involves several interacting processes rather than a single mechanism [27-31]. (figure 4).

General Characteristics of the Included Articles. Dicotyledonous species accounted for 54.6% of records and mono-

cotyledonous species for 40.6%, with 4.8% involving multiple, other, or unclassified groups (figure 5).

Controlled experiments dominated: pots 34.1%, greenhouse/growth chamber 25.3%, hydroponic/nutrient solution 22.3%, field 4.6%, and in vitro 4.0%. NaCl accounted for 74.5% of treatments, followed by saline soil 9.9% and saline irrigation 6.7%; saline-alkaline conditions accounted for only 0.5% (figure 6). NaCl experiments do not fully reproduce field soil complexity [12, 25, 32-37]. Among identified Si sources, nano-Si/nano-SiO_2 accounted for 18.3%, sodium silicate 17.5%, potassium silicate 12.6%, silicic acid 8.3%, calcium silicate 4.6%, and bulk SiO_2 1.9%; 23.9% were other or unspecified. Nutrient-solution application was most common (32.0%), followed by soil/root 26.9%, foliar 16.9%, combined 9.7%, and seed pri ming/soaking 6.5%. These differences limit direct comparison [25,38].

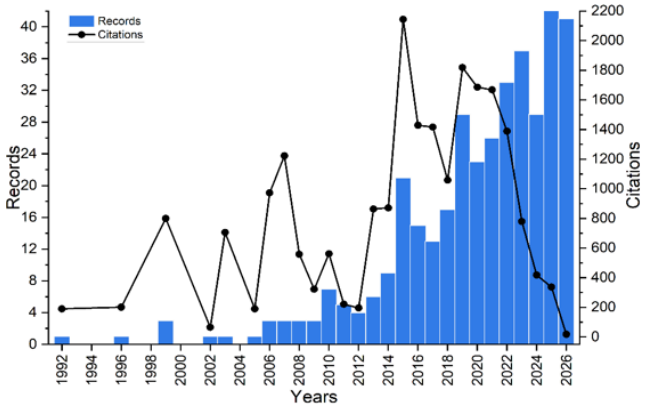


Figure 2 - Temporal dynamics of publication output and citation activity in research on Si-mediated salinity tolerance

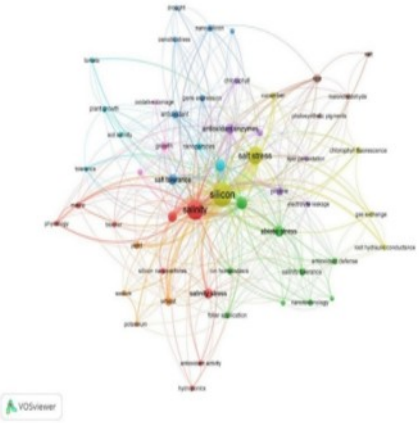


Figure 3 - Author-keyword co-occurrence network of research on Si-mediated salinity tolerance

Recent research increasingly addresses Si nanoparticles, ion homeostasis, antioxidant defense, gene expression, foliar application, and seed priming [12, 13, 31, 32]. However, species, genotype, treatment, salinity, and experimental-system differences limit direct comparison [33-36].

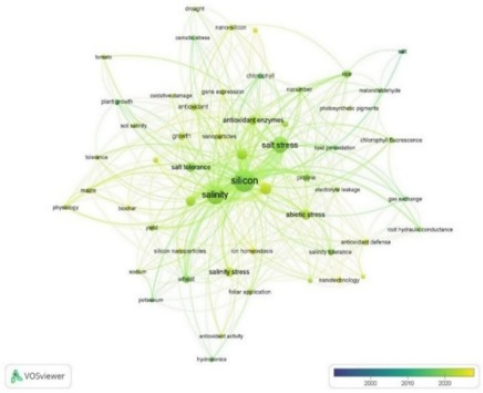


Figure 4 - Temporal overlay visualization of author keywords in research on Si-mediated salinity tolerance

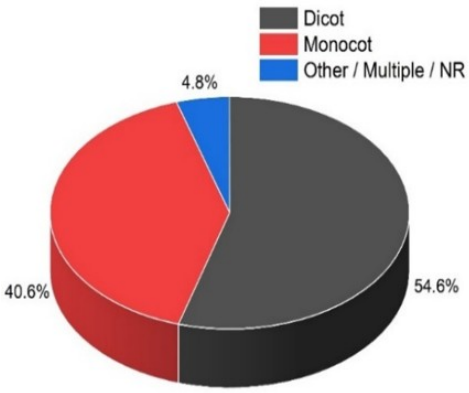


Figure 5 - Distribution of plant taxonomic groups among the articles included in the systematic review

Salinity intensity and Si dose were not pooled because units and experimental systems varied. Overall, the evidence was strongly weighted toward controlled NaCl studies, with limited field and saline-alkaline research; physiological benefits may therefore not translate directly to heterogeneous salt-affected soils [39].

Effects of Silicon on Ion Homeostasis under Salinity. Ion homeostasis was one of the most consistent responses: Si commonly reduced Na^+ uptake/transport, maintained K^+, and improved K^+/Na^+ balance, although effects varied by species, genotype, organ, salinity, and experimental conditions [23-25, 37].

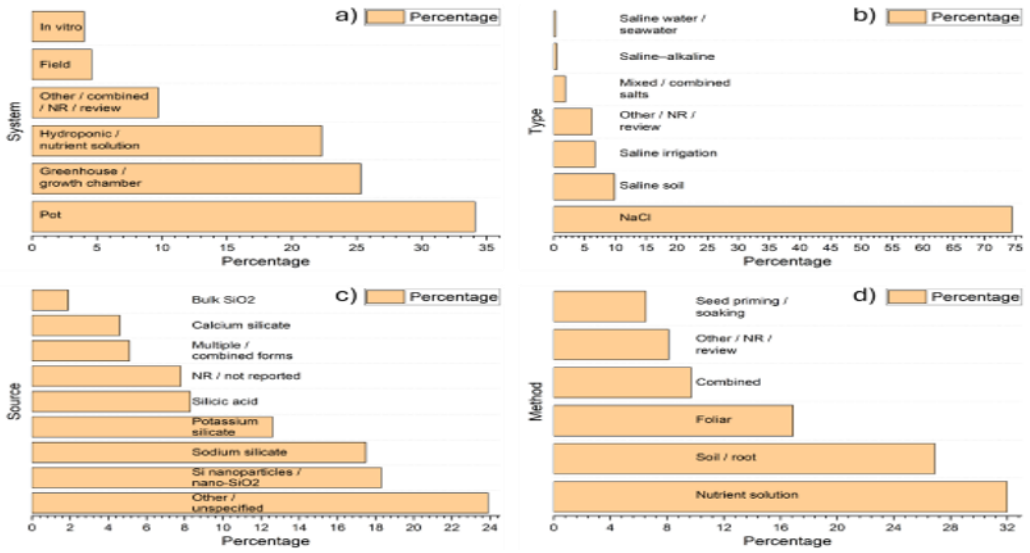


Figure 6 - General characteristics of the included articles: (a) experimental systems, (b) salinity treatments, (c) Si sources and formulations, and (d) Si application methods

Na^+ and K^+ Homeostasis and the K^+/Na^+ Ratio. Reduced Na^+ accumulation was frequently observed, although its extent depended on the plant organ and specific conditions. Such responses were reported in rice, wheat, maize, alfalfa, purslane, and liquorice [5, 40, 41]. In purslane, 1 mM sodium silicate reduced leaf Na^+ concentration and improved the K^+/Na^+ ratio under 120-240 mM NaCl, whereas a similar effect was not observed in the roots [11,42]. In rice, Si deposition in the roots can restrict apoplastic Na^+ movement and bypass flow, thereby reducing its transport to the shoots [40, 43]. Other studies have reported tissue redistribution or vacuolar compartmentation of Na^+ [44, 45], while in some cases shoot transport increased [46]. Thus, Si is better considered a regulator of Na^+ homeostasis rather than a uniform Na^+ exclusion mechanism. Silicon also frequently maintained or increased K^+ concentrations in the roots and shoots of rice, wheat, maize, alfalfa, and liquorice [5, 35, 41, 47].

Overall, Si improves K^+/Na^+ homeostasis by maintaining K^+ and/or restricting or redistributing Na^+. The K^+/Na^+ ratio should therefore be interpreted as a separate indicator from absolute K^+ concentration.

Si frequently maintained or increased K^+ in roots and shoots of rice, wheat, maize, alfalfa, and liquorice [5, 35, 41, 47].

Thus, Si improves K^+/Na^+ homeostasis through K^+ maintenance and/or Na^+ restriction or redistribution; the ratio should be interpreted separately from absolute K^+.

Variation in Ionic Responses: Ionic responses differed by genotype and species. In wheat, Si increased K^+ and reduced Na^+ in contrasting genotypes at 10 dS m^{-1}, but response magnitude differed [48]. Cucumber showed stronger overall responses than bitter gourd in some studies [10, 25, 27, 36, 45].

Treatment conditions also mattered. Nano-Si produced stronger responses than conventional Si in pea under 100-250 mM NaCl, while 50 mg L^{-1} SiO_2 nanoparticles outperformed 100 mg L^{-1} in potato [49-52].

Oxidative Stress and Antioxidant Defense. Reduced oxidative damage was among the most consistent responses: Si frequently decreased MDA, H_2O_2/ROS, and electrolyte leakage. Nano-Si increased CAT, SOD, and APX in chia, while in saline-soil wheat it reduced MDA by 17.3% and EL by 12.4% [53, 54].

Antioxidant enzymes also changed, but less consistently. In wheat, foliar Si increased SOD 50%, CAT 47%, POD 110%, and APX 8%; in Brassica juncea, APX, CAT, GR, and SOD increased while H_2O_2, MDA, and EL declined [48, 55].

Higher enzyme activity was not universally required; lower activity may reflect lower ROS production. Reduced MDA, H_2O_2/ROS, and EL therefore provide more direct evidence of protection than any single enzyme response [56].

Photosynthesis, Water Relations, and Osmotic Adjustment. Si frequently maintained chlorophyll, photosynthesis, stomatal conductance, and RWC. In cucumber and bitter gourd, net photosynthesis and stomatal conductance increased by 12.13% and 30.14%, respectively; foliar Si improved mungbean gas exchange, with the strongest response at 100 mg L^{-1} [51, 57]. Improved photosynthesis was often associated with better water status. Si increased RWC, leaf area, and biomass in safflower at 10 dS m^{-1}, while cotton studies linked improved water status to ABA-aquaporin regulation of root hydraulic conductance [58]. Osmotic responses were less consistent. Nano-Si priming in chia increased proline by 90.1% and carbohydrates by 146%, but proline should be interpreted together with water status, growth, and stress severity [53].

Growth, Biomass, and Yield Responses. Si frequently improved plant height, leaf area, root/shoot growth, and biomass. In safflower, foliar Si performed best at 2.5 mM; in pea under 100-250 mM NaCl, both Si forms improved growth, with a stronger response to nano-Si [49, 58]. Yield evidence was less consistent. Nano-Si seed priming at 200 mg L^{-1} increased chia seed yield by 149% and oil yield by 327%, while both Si forms improved pea yield [49, 53]. However, many studies were shortterm or controlled and did not follow reproductive development, so physiological benefits do not necessarily imply field yield gains.

Sources of Heterogeneity in Silicon Effectiveness. Si effectiveness depended on species/genotype, source and dose, application method, salinity, experimental system, and growth stage. In wheat, silicic acid benefited both salt-sensitive and tolerant genotypes, but magnitude differed among cultivars [48]; cucumber and bitter gourd also differed in response [57]. Both conventional and nano-Si were beneficial, but neither was universally superior. Nano-Si outperformed conventional Si in pea under equivalent concentrations, while 50 mg L^{-1} outperformed 100 mg L^{-1} in potato; application route also altered responses [48-51]. Salinity treatments (NaCl, saline soils, irrigation, mixed salts, saline–alkaline systems) are not directly equivalent. Soil and field experiments additionally vary in Si availability, soil properties, climate, and root–soil interactions. Most studies focused on germination or vegetative growth; fewer followed reproductive development. Early benefits may not persist to yield formation. Overall, no single optimal Si treatment is supported across crops and salinity conditions.

Crop-Specific Responses and Implications for Salt-Affected Agriculture. Evidence

for soybean was more limited and remained largely based on controlled experiments (table 2). Cotton was represented by only five articles but covered responses from ion homeostasis and antioxidant regulation to water relations, gene expression, biomass, yield, and fiber quality [16, 59-62]. Si increased biomass by approximately 50% in one experiment, while under 150 mM NaCl improved water status was associated with ABA-aquaporin regulation of root hydraulic conductance and water uptake. Responses were stronger under neutral salinity than under alkaline stress, where high pH was associated with reduced Si availability and uptake. Field evidence also showed increased emergence (78.3 to 96.3%) and seed-cotton yield (3830 to 4620 kg ha^{-1}; +20.6%), together with improved fiber characteristics. These results are agronomically relevant, but five articles are insufficient to identify an optimal Si formulation, dose, or application method.

Other crops, including barley, sorghum, alfalfa, sugarcane, mungbean, pea, potato, strawberry, pepper, and liquorice, generally showed the same broad response framework (table 2).

Table 2 - Crop-specific evidence for Si-mediated salinity tolerance and agronomic responses across the reviewed literature

Crop	Evidence base	Salinity / Si treatment	Main Si-mediated responses	Agronomic evidence	Main evidence limitation
1	2	3	4	5	6
Rice (Oryza sativa)	37 (9.8%)	Mainly 25-200 mM NaCl; saline soils. Silicates, silicic acid, SiNPs; root/soil, foliar, seed	Reduced Na^+ transport; improved K^+/Na^+ balance, antioxidant defense, photosynthesis and water status	Improved biomass and grain yield; field evidence available	Evidence concentrated in NaCl-based and controlled studies
Wheat (Triticum spp.)	37 (9.8%)	~35–200 mM NaCl; 4-12 dS m^{-1}. Silicates, silicic acid, SiNPs; root/soil, foliar, seed	Reduced Na^+ and oxidative damage; maintained K^+/Na^+ balance; improved photosynthesis and RWC	Improved biomass; grain/ yield responses reported; some field evidence	Strong genotype and application-dependent variation
Maize (Zea mays)	26 (6.9%)	~40-200 mM NaCl; saline soil/ irrigation. Silicates, silicic acid, SiNPs; root/ soil, foliar, seed	Na^+ redistribution/ compartmentation; improved K^+/Na^+ balance, antioxidant defense, photosynthesis and water status	Improved biomass and yield traits; field evidence available	Heterogeneous salinity and treatment systems
Tomato (Solanum lycopersicum)	25 (6.6%)	Mainly 20-250 mM NaCl; saline substrate. Silicates, SiNPs; root/substrate, foliar, seed	Improved ion homeostasis, oxidative protection, photosynthesis, RWC and hydraulic function	Mainly vegetative growth; some fruit/yield responses	Limited field validation
Cucumber (Cucumis sativus)	19 (5.0%)	Mainly 50-100 mM NaCl; up to 300 mM. Silicates, silicic acid, SiNPs; mainly root/ solution	Improved K^+/Na^+ balance and Na^+ sequestration; reduced oxidative damage; improved PSII, RWC and hydraulic function	Improved growth/ biomass; limited yield evidence	Field evidence scarce

Continuation of table 3

1	2	3	4	5	6
Soybean (Glycine max)	9 (2.4%)	Mainly 50-150 mM NaCl. Silicates, SiNPs; root, foliar, seed	Improved ion balance, antioxidant responses, photosynthesis and RWC; reduced oxidative damage	Improved biomass; limited reproductive/ yield evidence	Small, predominantly controlled evidence base
Cotton (Gossypium spp.)	5 (1.3%)	Neutral and alkaline salinity. Soluble Si, biostimulants, SiNPs; soil/root, foliar	Improved ion homeostasis and antioxidant defense; reduced ROS/MDA; enhanced ABA-aquaporin-mediated water regulation	Biomass improvement; field yield (+20.6%) and fiber-quality benefits reported	Only five articles; weaker responses under alkaline stress
Other crops†	-	NaCl, saline soils/ irrigation, mixed salts; diverse Si sources and applications	Improved ion homeostasis, oxidative protection, photosynthesis, water status and osmotic adjustment	Biomass commonly improved; yield/field evidence limited	Highly heterogeneous and individually underrepresented crops

Note: Percentages are based on 378 articles; crop categories are not mutually exclusive. †Other crops include less frequently studied species. SiNPs, silicon nanoparticles; RWC, relative water content; PSII, photosystem II; ROS, reactive oxygen species; MDA, malondialdehyde.

CONCLUSIONS

This systematic review demonstrates that silicon (Si) alleviates salinity stress through interconnected effects on ion homeostasis, oxidative protection, photosynthesis, water relations, and plant growth. Improved K^+/Na^+ balance and reduced oxidative damage were among the most consistent responses, although their magnitude varied with plant species and genotype, Si source and dose, application method, salinity conditions, growth stage, and experimental system.

Both conventional Si sources and silicon nanoparticles (SiNPs) showed beneficial effects, but the available direct comparisons do not establish the general superiority of either formulation or a universally optimal application strategy. The evidence was unevenly distributed among crops and dominated by controlled NaCl experiments, whereas field and Saline–alkaline studies remained scarce. Consequently, improvements in physiological traits and vegetative biomass cannot be assumed to translate into consistent yield benefits under field conditions.

Future research should prioritize standardized Si treatment reporting, direct comparisons of formulations and application methods, genotype-specific responses, and multi-location, multi-season field trials in well-characterized saline and saline-alkaline environments. Overall, Si represents a promising complementary approach to salinity management, but its agronomic effectiveness requires crop- and environment-specific validation.

FUNDING

This research was carried out within the framework of project No. AP26198533, funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan, entitled “Development of an Effective System for Enhancing Cotton Resilience and Restoring the Fertility of Re-salinized Soils through the Application of Silicon Fertilizers and Biological Preparations.

REFERENCES

1. Shokri N., Hassani A., Sahimi M. Multi-scale soil salinization dynamics from global to pore scale: A review //Reviews of Geophysics. -2024.-Vol.62, № 4. - P. e2023RG000804.

2. Balasubramaniam T. et al. Plants' response mechanisms to salinity stress // Plants. - 2023. - Vol. 12, № 12. - P. 2253.

3. Yanqing W. et al. Abiotic stress responses in crop plants: A multi-scale approach // Journal of Integrative Agriculture. - 2026. - Vol. 25, № 1. - P. 1–15.

4. Liang Y. Effects of silicon on enzyme activity and sodium, potassium and calcium concentration in barley under salt stress // Plant and Soil. - 1999. - Vol. 209, № 2. - P. 217–224.

5. Wang X.S., Han J.G. Effects of NaCl and silicon on ion distribution in the roots, shoots and leaves of two alfalfa cultivars with different salt tolerance // Soil Science & Plant Nutrition. - 2007. - Vol. 53, № 3. - P. 278–285.

6. Ghadirnezhad Shiade S.R. et al. Silicon at the Frontline: Enhancing Plant Multistress Tolerance // Journal of Soil Science and Plant Nutrition. - 2026. - Vol. 26, № 1. - P. 3089–3111.

7. Mohamed I.A.A. et al. Nano-improved plant salinity tolerance: The importance of K+/Na+ homeostasis and crosstalk between Ca2+ and hormones // Plant Nano Biology. - 2025. - P. 100196.

8. Xu C.X., Ma Y.P., Liu Y.L. Effects of silicon (Si) on growth, quality and ionic homeostasis of aloe under salt stress // South African Journal of Botany. - 2015. - Vol. 98. - P. 26–36.

9. Yunus Q., Zari M. Effect of exogenous silicon on ion distribution of tomato plants under salt stress // Communications in Soil Science and Plant Analysis. - 2017. - Vol. 48, № 16. - P. 1843–1851.

10. Harizanova A. et al. Effect of silicon on photosynthetic rate and the chlorophyll fluorescence parameters at hydroponically grown cucumber plants under salinity stress // Journal of Central European Agriculture. - 2019. - Vol. 20, № 3. - P. 953–960.

11. Kafi M., Rahimi Z. Effect of salinity and silicon on root characteristics, growth, water status, proline content and ion accumulation of purslane (Portulaca oleracea L.) // Soil Science and Plant Nutrition. - 2011. - Vol. 57, № 2. - P. 341–347.

12. Abdel-Haliem M.E.F. et al. Effect of silica ions and nano silica on rice plants under salinity stress // Ecological Engineering. - 2017. - Vol. 99. - P. 282–289.

13. Almutairi Z.M. Effect of nano-silicon application on the expression of salt tolerance genes in germinating tomato (Solanum lycopersicum L.) seedlings under salt stress // Plant Omics. - 2016. - Vol. 9, № 1. - P. 106–114.

14. Stadnik B., Tobiasz-Salach R., Mazurek M. Effect of silicon on oat salinity tolerance: Analysis of the epigenetic and physiological response of plants // Agriculture. - 2022. - Vol. 13, № 1. - P. 81.

15. Hurtado A.C. et al. Different methods of silicon application attenuate salt stress in sorghum and sunflower by modifying the antioxidative defense mechanism // Ecotoxicology and Environmental Safety. - 2020. - Vol. 203. - P. 110964.

16. Guo J. et al. Basal application of silicon fertilizer enhances antioxidant defense and mitigates oxidative damage in cotton under neutral salt stress // Industrial Crops and Products. - 2026. - Vol. 249. - P. 123811.

17. Silva J.O.N. et al. Effects of silicon alone and combined with organic matter and Trichoderma harzianum on sorghum yield, ions accumulation and soil properties under saline irrigation // Agriculture. - 2023. - Vol. 13, № 11. - P. 2146.

18. Wang X. et al. Effects of NaCl and silicon on activities of antioxidative enzymes in roots, shoots and leaves of alfalfa // African Journal of Biotechnology. - 2011. - Vol. 10, № 4. - P. 545.

19. Am D. et al. Effect of silicon on the tolerance of wheat (Triticum aestivum L.) to salt stress at different growth stages: Case study for the management of irrigation water // Plants. - 2018. - Vol. 7, № 2. - P. 29.

20. Page M.J. et al. The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews // BMJ. - 2021. – T. 372.

21. De Cassai A. et al. Methodological standards for conducting high-quality systematic reviews // Biology. - 2025. - Vol. 14, № 8. - P. 973.

22. Van Eck N.J., Waltman L. Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping // Scientometrics. - 2010. - Vol. 84, № 2. - P. 523–538.

23. Rizwan M. et al. Mechanisms of silicon-mediated alleviation of drought and salt stress in plants: A review // Environmental Science and Pollution Research. - 2015. - Vol. 22, № 20. - P. 15416–15431.

24. Zhu Y.X., Gong H.J., Yin J.L. Role of silicon in mediating salt tolerance in plants: A review // Plants. - 2019. - Vol. 8, № 6. - P. 147.

25. Dhiman P. et al. Fascinating role of silicon to combat salinity stress in plants: An updated overview // Plant Physiology and Biochemistry. - 2021. - Vol. 162. - P. 110–123.

26. Nikpour Rashidabad N., Farhangi-Abriz S., Hashemi M. Modulation of oxidative stress and plant responses to salinity by nanosilicon: Current insights and future perspectives // Frontiers in Plant Science. - 2026. - Vol. 17. - P. 1857009.

27. Zhu Z. et al. Silicon alleviates salt stress and increases antioxidant enzymes activity in leaves of salt-stressed cucumber (Cucumis sativus L.) // Plant Science. - 2004. - Vol. 167, № 3. - P. 527–533.

28. Sattar A. et al. Silicon mediates the changes in water relations, photosynthetic pigments, enzymatic antioxidants activity and nutrient uptake in maize seedling under salt stress // Grassland Science. - 2016. - Vol. 62, № 4. - P. 262–269.

29. Javaid T. et al. Silicon nutrition improves growth of salt-stressed wheat by modulating flows and partitioning of Na+, Cl− and mineral ions // Plant Physiology and Biochemistry. - 2019. - Vol. 141. - P. 291–299.

30. Meng Y. et al. Exogenous silicon enhanced salt resistance by maintaining K+/Na+ homeostasis and antioxidant performance in alfalfa leaves // Frontiers in Plant Science. - 2020. - Vol. 11. - P. 1183.

31. Ijaz U. et al. Rice straw based silicon nanoparticles improve morphological and nutrient profile of rice plants under salinity stress by triggering physiological and genetic repair mechanisms // Plant Physiology and Biochemistry. - 2023. - Vol. 201. - P. 107788.

32. Sepasi M. et al. Silicon nanoparticles (SiNPs) stimulated secondary metabolism and mitigated toxicity of salinity stress in basil (Ocimum basilicum) by modulating gene expression: A sustainable approach for crop protection // Environmental Science and Pollution Research. - 2024. - Vol. 31, № 11. - P. 16485–16496.

33. Altuntas O., Dasgan H.Y., Akhoundnejad Y. Silicon-induced salinity tolerance improves photosynthesis, leaf water status, membrane stability, and growth in pepper (Capsicum annuum L.) // HortScience. - 2018. - Vol. 53, № 12. - P. 1820–1826.

34. Somaddar U. et al. Assessing silicon-mediated growth performances in contrasting rice cultivars under salt stress // Plants. - 2022. - Vol. 11, № 14. - P. 1831.

35. Ali M. et al. Silicon mediated improvement in the growth and ion homeostasis by decreasing Na+ uptake in maize (Zea mays L.) cultivars exposed to salinity stress // Plant Physiology and Biochemistry. - 2021. - Vol. 158. - P. 208–218.

36. Dong J. et al. Comparative effects of silicon and silicon nanoparticles on photosynthetic performance, antioxidant capacity, and Na/K homeostasis in cucumber under salt stress // Plant Nano Biology. - 2026. - P. 100318.

37. Liu B., Soundararajan P., Manivannan A. Mechanisms of silicon-mediated amelioration of salt stress in plants // Plants. - 2019. - Vol. 8, № 9. - P. 307.

38. Siddiqi K.S. et al. Harnessing silicon nanoparticles and various forms of silicon for enhanced plant growth performance under salinity stress: Application and mechanism // Discover Nano. - 2025. - Vol. 20, № 1. - P. 89.

39. Narula S., Chaudhry S. Emerging significance of silicon in abiotic stress tolerance: A review // Discover Plants. - 2025. - Vol. 2, № 1. - P. 307.

40. Yeo A.R. et al. Silicon reduces sodium uptake in rice (Oryza sativa L.) in saline conditions and this is accounted for by a reduction in the transpirational bypass flow // Plant, Cell & Environment. - 1999. - Vol. 22, № 5. - P. 559–565.

41. Yeo A.R. et al. Silicon reduces sodium uptake in rice (Oryza sativa L.) in saline conditions and this is accounted for by a reduction in the transpirational bypass flow // Plant, Cell & Environment. - 1999. - Vol. 22, № 5. - P. 559–565.

42. Zhu Y., Gong H. Beneficial effects of silicon on salt and drought tolerance in plants: A review // Agronomy for Sustainable Development. - 2014. - Vol. 34, № 2. - P. 455–472.

43. Gong H.J., Randall D.P., Flowers T.J. Silicon deposition in the root reduces sodium uptake in rice (Oryza sativa L.) seedlings by reducing bypass flow // Plant, Cell & Environment. - 2006. - Vol. 29, № 10. - P. 1970–1979.

44. Bosnic P. et al. Silicon mediates sodium transport and partitioning in maize under moderate salt stress // Environmental and Experimental Botany. - 2018. - Vol. 155. - P. 681–687.

45. Gou T.Y. et al. Silicon upregulates NHX1 expression to enhance Na+ partitioning into vacuoles in leaf mesophyll cells of cucumber under salt stress. - 2020.

46. Tong S. et al. Silicon weakens the outer apoplastic barrier in roots of rice and delays its formation, resulting in increased Na+ and Cl− fluxes to the shoot // Environmental and Experimental Botany. - 2024. - Vol. 226. - P. 105941.

47. Shen Z. et al. Silicon improves ion homeostasis and growth of liquorice under salt stress by reducing plant Na+ uptake // Scientific Reports. - 2022. - Vol. 12, № 1. - P. 5089.

48. Akram S., Anwar-ul-Haq M., Saqib M., Waraich E.A. Improving salinity tolerance of wheat (Triticum aestivum L.) genotypes by foliar and soil applications of silicic acid (H2SiO3) // Soil & Environment. - 2025. - Vol. 44, № 1. - P. 125.

49. Ismail L.M., Soliman M.I., Abd El-Aziz M.H., Abdel-Aziz H.M. Impact of silica ions and nano silica on growth and productivity of pea plants under salinity stress // Plants. - 2022. - Vol. 11, № 4. - P. 494.

50. Gowayed M.H., Al-Zahrani H.S., Metwali E.M. Improving the salinity tolerance in potato (Solanum tuberosum) by exogenous application of silicon dioxide nanoparticles // International Journal of Agriculture and Biology. - 2017. - Vol. 19, № 1.

51. Kumar V., Soni A., Sharma K.D. Impact of Silicon Application on Physiochemical Traits of Vigna radiata Exposed to Salinity Stress // Indian Journal of Agricultural Research. - 2024. - Vol. 58, № 1. - P. 113.

52. Yin J. et al. Identification of ginger (Zingiber officinale Roscoe) NHX gene family members and characterization of their expression patterns in silicon alleviating salt stress. - 2024.

53. Haghaninia M., Mashhouri S.M., Najafifar A., Soleimani F., Mirzaei A. Impact of silicon nanoparticle priming on metabolic responses and seed quality of Chia (Salvia hispanica L.) under salt stress // Food Bioscience. - 2025. - Vol. 65. - P. 106119.

54. Fouladi Z., Jalali M., Valizadeh-Rad K., Etesami H. Individual and combined effects of nano-silicon, silicate-solubilizing bacteria, and earthworm on wheat growth under salinity stress // Scientific Reports. - 2026.

55. Alam P., Balawi T.A., Qadir S.U., Ahmad P. Gibberellic acid and silicon ameliorate NaCl toxicity in Brassica juncea: Possible involvement of antioxidant system and ascorbate-glutathione cycle // Plants. - 2023. - Vol. 12, № 6. - P. 1210.

56. Gómez-Santos M., González-García Y., Pérez-Álvarez M., Cadenas-Pliego G., Juárez-Maldonado A. Impact of calcium-silicon nanoparticles on flower quality and biochemical characteristics of Lilium under salt stress // Plant Stress. - 2023. - Vol. 10. - P. 100270.

57. Ghani M.N.O., Awang Y., Ismail M.F. Growth, ion contents and photosynthesis of salt-sensitive and less salt-sensitive cucurbits treated with silicon // Malaysian Applied Biology. - 2018. - Vol. 47, № 2. - P. 25–31.

58. Jam B.J., Shekari F., Andalibi B., Fotovat R., Jafarian V., Najafi J., Mastinu A. Impact of silicon foliar application on the growth and physiological traits of Carthamus tinctorius L. exposed to salt stress // Silicon. - 2023. - Vol. 15, № 3. - P. 1235–1245.

59. Nisar S., Iqbal M., Ashraf J., Naeem M., Ahmad Z., Afzal M., Raza A. Enhancing salt tolerance in cotton by improving its morpho-physiological and antioxidant potential through foliar applied silicon // Silicon. - 2022. - Vol. 14, № 17. - P. 11243–11252.

60. Liang Y., Liu H., Zhang Y., Li P., Fu Y., Li S., Gao Y. Exogenous application of silica nanoparticles mitigates combined salt and low-temperature stress in cotton seedlings by improving the K+/Na+ ratio and antioxidant defense // Plant Stress. - 2024. - Vol. 14. - P. 100597.

61. Wang X., Ruan S., Ma X., Iqbal A., Dong Q., Gui H. et al. Exogenous silicon enhances the salt tolerance of cotton seedlings by regulating water status through abscisic acid and aquaporins // Journal of the Science of Food and Agriculture. - 2026. - Vol. 106, № 6. - P. 3351–3361.

62. Saidova M., Mamasolieva M., Makhkamova D., Yadgarov A., Babaev B., Babaeva Z. et al. Silicon-based adaptive approaches to enhance cotton (Gossypium hirsutum L.) resilience under salinity stress // Journal of Cotton Research. - 2026. - Vol. 9, № 1. - P. 22.

ТҮЙІН

А.И. Сулейменова[1,2]*, М.Н. Пошанов[1], А.С. Вырахманова[1]

МЕХАНИЗМДЕРДЕН ДАЛАЛЫҚ ҚОЛДАНУҒА ДЕЙІН: ӨСІМДІКТЕРДІҢ ТҰЗДАНУҒА ТӨЗІМДІЛІГІН КРЕМНИЙ АРҚЫЛЫ АРТТЫРУҒА ЖҮЙЕЛІ ШОЛУ

[1]Ө.О. Оспанов атындағы Қазақ топырақтану және агрохимия ғылыми-зерттеу институты, 050060, Алматы, әл-Фараби даңғылы, 75В, Қазақстан

[2]Қазақ ұлттық аграрлық зерттеу университеті, 050010, Алматы, Абай даңғылы, 8, Қазақстан, e-mail: s.altynai87@mail.ru

Зерттеу PRISMA 2020 нұсқаулығына сәйкес жүргізілді. Scopus дерекқорындағы екі өзара толықтырушы іздеу нәтижесінде 746 ғылыми жазба анықталып, іріктеу үдерісінен кейін 378 зерттеу талдауға енгізілді. Әдебиеттерді талдау кремнийдің тұзға төзімділікті арттыруы Na^+ реттелуінің жақсаруымен, K^+/Na^+ арақатынасының тұрақтануымен, тотығу зақымдануының төмендеуімен, фотосинтез бен су режимінің сақталуымен және өсім мен биомассаның қалпына келуімен байланысты екенін көрсетті. Дәстүрлі кремний көздері мен нанокремний белгілі бір жағдайларда тиімді болғанымен, олардың тікелей салыстырмалы зерттеулері аз болғандықтан, нанокремнийдің жалпы артықшылығы дәлелденбеген. Зерттеулердің басым бөлігі бақыланатын жағдайда жүргізіліп, далалық зерттеулер 4,6%-ды құрады. Болашақ зерттеулерде кремний дозаларын стандарттау, әртүрлі көздері мен қолдану тәсілдерін салыстыру, генотиптік ерекшеліктерді және көпжылдық далалық жағдайларды зерттеу қажет. Жалпы алғанда, кремний тұздануды басқару шараларында перспективалы, алайда оның тиімділігі нақты жағдайларға байланысты.

Түйінді сөздер: кремний; тұздану стресі, тұзға төзімділік, иондық гомеостаз, тотығу стрессі, кремний нанобөлшектері, дақылдардың өнімділігі, тұзданған топырақтар, жүйелі шолу.

РЕЗЮМЕ

А.И. Сулейменова[1,2]*, М.Н. Пошанов[1], А.С. Вырахманова[1]

ОТ МЕХАНИЗМОВ К ПОЛЕВОМУ ПРИМЕНЕНИЮ: СИСТЕМАТИЧЕСКИЙ ОБЗОР КРЕМНИЙ-ОПОСРЕДОВАННОГО ПОВЫШЕНИЯ СОЛЕУСТОЙЧИВОСТИ РАСТЕНИЙ

[1]Казахский научно-исследовательский институт почвоведения и агрохимии имени У.У. Успанова, 050060, Алматы, пр. аль-Фараби, 75В, Казахстан,

[2]Казахский национальный аграрный исследовательский университет, 050010, Алматы, пр., Абая, 8, Казахстан, e-mail: s.altynai87@mail.ru

Исследование проведено в соответствии с рекомендациями PRISMA 2020. В результате двух взаимодополняющих поисковых стратегий в базе данных Scopus было выявлено 746 научных записей, из которых после процедуры отбора в анализ было включено 378 исследований. Анализ литературы показал, что повышение солеустойчивости растений под воздействием кремния связано с улучшением регуляции Na^+, стабилизацией соотношения K^+/Na^+, снижением окислительного повреждения, поддержанием фотосинтеза и водного режима, а также восстановлением роста и биомассы. Традиционные источники кремния и нанокремний могут быть эффективными при определённых условиях, однако из-за ограниченного числа прямых сравнительных исследований общее преимущество нанокремния не подтверждено. Большинство исследований проведено в контролируемых условиях, тогда как доля полевых исследований составила 4,6%. В будущих исследованиях необходимо стандартизировать дозы кремния, сравнивать различные источники и способы его применения, учитывать генотипические особенности и проводить многолетние полевые исследования. В целом кремний является перспективным, но зависящим от условий компонентом управления засолением.

Ключевые слова: кремний, солевой стресс, солеустойчивость, ионный гомеостаз, окислительный стресс, наночастицы кремния, продуктивность сельскохозяйственных культур, засолённые почвы, систематический обзор.

INFORMATION ABOUT AUTHORS

1. Suleimenova Altynay Izteleuovna - Head of the Department of Soil Fertility and Soil Biology, Master's degree, https://orcid.org/0009-0006-2130-7572,
e-mail: s.altynai87@mail.ru

2. Poshanov Maksat Nurbayevich - Head of the Department of Saline Soil Reclamation, PhD, https://orcid.org/0000-0002-8657-953X,
e-mail: maksat_90.okkz@mail.ru

3. Vyrakhmanova Assem Sabitkanovna - Scientific Secretary, PhD, https://orcid.org/0000-0002-6295-653X, e-mail: asem-v80@mail.ru

Главный редактор

Б.У. Сулейменов

Редакционная коллегия:

Р.Х. Рамазанова (заместитель главного редактора),
М.А. Ибраева (ответственный секретарь),
Георг Гуггенбергер (Германия), А.В. Козлов (Россия),
М.Г. Мустафаев (Азербайджан), М.В. Филипова (Болгария),
Б.М. Амиров, Б.Н. Насиев, Г.А. Сапаров,
М.Т. Егізтай (компьютерная верстка)

Тираж 200 экз.

Индекс 74197

ISSN 1999-740X