



ISSN 1999-740X (Print)
ISSN 2959-3433 (Online)
№ 4 (72) ДЕКАБРЬ 2025

ПОЧВОВЕДЕНИЕ И АГРОХИМИЯ



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 (72) ДЕКАБРЬ 2025

*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 (72) декабрь 2025

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 №152 от 01 марта 2023 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

СОДЕРЖАНИЕ

Плодородие почв

- Ж. Оспанбаев, А.С. Досжанова, А.С. Сембаева, К.А. Мырзабек, Н.А. Сатуллаев**
Эффективность биочара на деградированных орошаемых почвах юго-востока Казахстана..... 5

Экология почв

- М.Р. Керимкулова, Г.Н. Қасымжанова, Е.О. Досжанов, А.Р. Керимкулова, А.Н. Жумажанов, Н.М. Асанбек** Наноқұрылымды сорбенттер көмегімен ауыр металдармен ластанған топырақты бақылау және тазалау әдісін әзірлеу 16
- A.Yskak, G.N. Dauletkeldi, K.A. Kazbekova, S.A. Daribayeva** The state of soil pollution by heavy metals in Kostanay region..... 25

Агрехимия

- С.Б. Кененбаев, В.Н. Гусев, А.М. Сагимбаева, К.У. Рустимова** Дистанционная диагностика обеспеченности почв элементами питания и урожайности озимой пшеницы на орошаемых светло-каштановых почвах..... 38
- Р.Х. Рамазанова, К.К. Мусаева, Н.С. Асимжанов, З.А. Зарип, А.К. Абай**
Агрехимические свойства серозема светлого при применении биостимуляторов и микроудобрений при возделывании сахарной свёклы в условиях Жамбылской области 51

Обзорные статьи

- А.К. Аманбосын, А.А. Курманбаев** Роль биоцементации в решении проблем стабилизации почв и секвестрации углерода..... 64
- Г.Н. Бисенова, А.Ж. Темирханов, Ж.Б. Текебаева, Ж.А. Нұрбекова, Д.О. Евнеева, А.Б. Абжалелов, Ж.М. Бекшин** Оценка влияния использования ферментированного перегноя КРС на качество почвы и здоровье растений 80

Некролог

- Рамазанова Сара Бекентаевна**..... 95
- Черненко Валентина Григорьевна**..... 96

CONTENT

Soil fertility

- Zh. Ospanbayev, A.S. Doszhanova, A.S. Sembayeva, K.A. Myrzabek, N.A. Satullayev**
Effectiveness of biochar on degraded irrigated soils in southeast Kazakhstan.....5

Soil ecology

- M.R. Kerimkulova, G.N. Kassymzhanova, Ye.O. Doszhanov, A.R. Kerimkulova,**
A.N. Zhumazhanov, N.M. Assanbek Development of a method for monitoring and
remediating heavy metal-contaminated soil using nanostructured sorbents..... 16
- A.Yskak, G.N. Dauletkeldi, K.A. Kazbekova, S.A. Daribayeva** The state of soil pollution
by heavy metals in Kostanay region25

Agrochemistry

- S.B. Kenenbaev, V.N. Gusev, A.M. Sagimbaeva, K.U. Rustemova** Remote diagnostics of
soil nutrient supply and yield of winter wheat on irrigated light chestnut soils..38
- R.Kh. Ramazanova, K.K. Mussayeva, N.S. Asimzhanov, Z.A. Zarip, A.K. Abay**
Agrochemical properties of light sierozem under the application of biostimulants
and micronutrients during sugar beet cultivation in the conditions of Zhambyl
region.....51

Reviews

- A.K. Amanbossyn, A.A. Kurmanbayev** The role of biocementation in addressing soil
stabilization and carbon sequestration issues64
- G.N. Bissenova, A.Zh. Temirkhanov, Zh.B. Tekebaeva, Zh.A. Nurbekova,**
D.O. Evneeva, A.B. Abzhalelov, Zh.M. Bekshin Assessment of the impact of
fermented cattle humus use on soil quality and plant health80

Necrology

- Ramazanova Sara Bekentayevna**95
- Chernenok Valentina Grigoryevna**96

ПЛОДОРОДИЕ ПОЧВ

ГРНТИ 68.31.21; 87.15.19

DOI: 10.51886/1999-740X_2025_4_5

**Ж. Оспанбаев^{1,2}, А.С. Досжанова^{1*}, А.С. Сембаева^{1,2}, К.А. Мырзабек¹,
Н.А. Сатуллаев¹****ЭФФЕКТИВНОСТЬ БИОЧАРА НА ДЕГРАДИРОВАННЫХ ОРОШАЕМЫХ ПОЧВАХ
ЮГО-ВОСТОКА КАЗАХСТАНА**¹НАО «Казахский национальный аграрный исследовательский университет»,
050010, Алматы, пр. Абая, 8, Казахстан, *e-mail: ainurdoszhanova@mail.ru²ТОО «Казахский научно-исследовательский институт земледелия и
растениеводства», 040909, Алматинская область, Алмалыбак,
ул. Ерлепесова, 1, Казахстан

Аннотация. В статье приведены результаты полевых исследований по изучению влияния различных доз березового биочара на агрофизические и агрохимические свойства деградированных орошаемых рисово-болотных почв Акдалинского массива орошения юго-востока Казахстана. Применение биочара в зависимости от доз внесения способствует повышению урожайности сои на 0,16-1,48 т/га или на 10-96%, риса на 0,17-0,97 т/га или на 6-36%, яровой пшеницы на 0,05-1,8 т/га или 2-65%. В целом за 3 года применение биочара обеспечило получение 1,34-3,68 тонн дополнительного зерна риса, пшеницы и сои в суммарном виде. Внесение под основную обработку почвы биочара в дозах 15-20 т/га способствует улучшению объемной массы, повышению содержания агрономически ценных и водопрочных агрегатов в пахотном слое почвы.

Ключевые слова: рисово-болотные почвы, биочар, орошаемое земледелие, рис, яровая пшеница, соя, засоление, урожайность.

ВВЕДЕНИЕ

Результаты ежегодного мониторинга орошаемых земель, проводимого гидрогеолого-мелиоративными экспедициями, показывают, что в настоящее время более 50% орошаемых земель имеют различную степень засоления и более 30% являются солонцеватыми. В то же время огромные объемы дренажно-сбросных и сточных вод, формирующихся на орошаемых землях и в населенных пунктах (до 10-30%), загрязняют водные источники и ухудшают эколого-мелиоративную обстановку поливных земель и прилегающих территорий [1].

Исследования по изучению биочара в Казахстане единичны, они касались в основном исследований по реабилитации загрязненных тяжелыми металлами почв горнометаллургических предприятий города Риддер Восточно-Казахстанской области [2]. Результаты исследования, проведенные на пло-

дородных темно-каштановых почвах, показали достаточно высокую эффективность применения биоугля под овощные культуры [3].

Однако, до сих пор целенаправленных исследований по изучению эффективности биочара под основные полевые культуры орошаемой зоны Казахстана не проводилось, не выявлены его мелиоративные качества для восстановления деградированных малопродуктивных земель юга и юго-востока Казахстана, в частности обыкновенные сероземы с близким залеганием галечников, такыровидные почвы, которые характеризуются очень низким содержанием органического вещества (менее 1%).

Связь между свойствами биочара и его функцией в качестве улучшителя почв хорошо иллюстрируется соотношением между влагоудерживающей способностью почв и пористостью биочара. Повышенная пористость биочара

увеличивает водоудерживающую способность, в зависимости от исходного сырья биочара, типа почвы и скорости смешивания [4, 5]. Способность биочара повышать водоудерживающую способность почвы, имеет большое значение для районов, подверженных засухе [6]. Другие исследования положительно связывают применение биочара с повышенной влагоудерживающей способностью почвы [7-9].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Изучение действия и последствий различных доз внесения биочара на агрофизические и агрохимические свойства рисово-болотных почв и особенности формирования урожая риса, сои и яровой пшеницы осуществлялось путем закладки и проведения полевых опытов и лабораторных исследований. Полевые опыты заложены на полях ТОО «Агрофирма Бірлік» Балхашского района Алматинской области.

Объектами исследований были основные культуры орошаемой зоны юго-востока Казахстана: рис, пшеница и соя.

Полевой опыт закладывался по следующей схеме: пять доз биочара из расчета в т/га: 0; 5; 10; 15; 20.

Эффективность доз биочара изучалась на трех культурах: 2022 год – соя, сорт Жансая (действие биочара первого года); 2023 год – рис, сорт Регул (последствие биочара второго года); 2024 год – яровая пшеница, сорт Казахстанская 10 (последствие третьего года).

Площадь делянок 30 м² (длина 10 м, ширина 3 м), повторность опыта - трехкратная. Защитные полосы 350 м. Общая площадь составляет 800 м².

Фенологические наблюдения за ростом и развитием растений проведены в основные фазы вегетации по методике Госкомиссии по сортоиспытанию [10, 11].

Отбор образцов для изучения содержания питательных элементов в почве и растениях проводился по основ-

ным фазам роста и развития изучаемых культур. В научно-исследовательской работе применялись следующие методики исследований почв: общий гумус определялся по И.В. Тюрину в модификации В.Н. Симакова [12]; лабильный гумус по И.В. Тюрину в модификации В.В. Пономаревой и Т.А. Плотниковой [13]; легкогидролизуемый азот определялся по методу И. Тюрина и Н. Кононовой [14]; нитратный азот – ионометрическим методом [15]; подвижный фосфор и обменный калий по методу Б.П. Мачигина в модификации ЦИНАО [16]; Засоленность определялась по плотному остатку водной вытяжки – ГОСТ 26423-85 – ГОСТ 26428-85. Метод определения катионно-анионного состава водной вытяжки почвы. Определение объемной массы проводился по методу Качинского Н. А. Структурный анализ (сухое и мокрое просеивание по Н. И. Саввинову проводили в лаборатории.

Перед уборкой урожая с трех повторностей опыта отбирались растительные образцы для определения основных элементов структуры урожая.

Учет урожая проводился поделочно прямым комбайнированием и методом пробных площадок. Обработка урожайных данных проводилась по методике Доспехова [17].

Биочар вносили вручную осенью под отвальную вспашку на глубину 20-22 см (рисунок 1). В качестве биочара использовался древесный уголь из березы *Betula alba* со следующими характеристиками: содержание углерода 88%; пористость 80%; плотность 0,38 г/см³.

Удобрение (аммофос с N – 12%, P₂O₅ – 46%) вносили 100 кг/га одновременно при посеве изучаемых культур малогабаритной сеялкой Vtnce-Tudo-7500. Полив произведен микродисперсным дождеванием. В опытах применялась рекомендуемая агротехника для изучаемых культур.



Рисунок 1 - Внесение биочара под отвальную вспашку

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Климат Акдалинского массива резко континентальный с большой разницей температур дня и ночи, лета и зимы, с холодной малоснежной зимой и жарким сухим летом.

Необходимо отметить существенное повышение среднемесячной температуры вегетационного периода за период исследований по сравнению со среднемноголетним показателем. Так, среднемесячная температура вегетационного периода (март-сентябрь) составила в 2022 году $19,3^{\circ}$, в 2023 году $18,8^{\circ}$ и 2024 году $21,3^{\circ}$, против $17,1^{\circ}$ при многолетней норме.

В 2022 году за вегетационный период выпало 355,7 мм осадков, в 2023 году 92,1 мм осадков и в 2024 году 255 мм осадков, при многолетней норме 170 мм.

Рисово-болотные почвы формируются на возвышенных участках равнин под разреженной полынной и солянковой растительностью. Почвообразующие породы - суглинки и супеси. Содержание гумуса в верхнем горизонте низкое, колеблется от 0,4% до 1,6%, мощность его 10-15 см, гранулометрический состав - супесчаный.

Рисово-болотные солонцеватые почвы содержат в верхних горизонтах

большое количество обменного натрия, что определяет их плохие водно-физические свойства. Для профиля всех родов рисово-болотных почв характерно наличие плотной пористой или ноздреватой корки с поверхности мощностью до 6-7 см, обычно разбитой трещинами на полигоны, низкая гумусированность, высокая карбонатность. С глубины 70-100 см часто встречаются погребенные гумусовые горизонты, а также ржавые пятна, образовавшиеся во время пойменной гидроморфной стадии развития почв. Почвообразующими породами для них служат слоистые древнеаллювиальные отложения различного механического состава.

По химизму засоления преобладают хлоридно-сульфатный, содово-сульфатный типы, по степени - среднее и сильное засоление (таблица 1).

Засоление почв на орошаемых землях является динамичным показателем почвенно-мелиоративных условий и обусловлено степенью воздействия ирригационно-хозяйственных факторов и природных условий. Поэтому направленность вторичного засоления почв можно выявлять только на основании длительных периодических наблюдений.

Таблица 1 – Химизм и степень засоления рисово-болотных почв под рисом в разные фазы его развития (слой 0-20 см)

Сроки отбора	Точки отбора образцов	Сумма солей, %	Отношение, мг-экв.			Химизм засоления	Степень засоления
			$\frac{Cl'}{SO_4''}$	$\frac{HCO_3'}{Cl'}$	$\frac{HCO_3'}{SO_4''}$		
28.05.2022	1	0,51	0,17	0,81	0,14	Сульфатный	Средняя
	2	0,62	0,17	1,98	0,34	Содово-сульфатный	Сильная
	3	0,98	0,15	1,17	0,18	Содово-сульфатный	Очень сильная
31.08.2022	1	0,10	-	1,71	-	Сульфатный	-
	2	0,21	1,18	2,48	2,93	Хлоридно-содовый	Средняя
	3	0,32	0,73	1,34	0,98	Содово-сульфатный	Средняя

Интенсивность накопления солей на орошаемых землях зависит от множества факторов. Природные факторы, как климат, рельеф, дренированность территории, засоленность почвообразующих и подстилающих пород и наличие минерализованных грунтовых вод определяют развитие первичного засоления почв. При несоблюдении режима орошения и технологии полива происходит вторичное засоление почв, приводящее к деградации, снижению продуктивности орошаемых земель и ухудшению экологической ситуации на орошаемых землях.

Показатель объемной массы за годы исследований в верхнем горизонте изучаемой почвы (0-10 см) колебался в пределах 0,95-1,17 г/см³, что указывает на низкую и среднюю уплотненность рисово-болотных почв. С глубиной плотность почвы существенно увеличивается, достигая в нижних слоях (20-40 см) 1,49 г/см³ (рисунок 2).

Внесение биочара оказывает существенное влияние на уплотненность пахотного слоя рисово-болотной почвы (0-10 и 10-20 см), особенно в последствии во второй и третий год.

Эффективность биочара в снижении уплотненности рисово-болотной почвы наиболее отчетливо проявляется под культурами риса и яровой пшени-

цы. Так, в пахотном слое (0-10 и 10-20 см) снижение уплотненности почвы от последствий 15-20 т/га биочара составляет под рисом 7-11%, под яровой пшеницей 14-15%, при внесении этих доз биочара под культуру сои, снижение уплотненности почвы составляет 3-10%.

Агрономически ценной являются комковато-зернистая структура с размером агрегатов от 0,25 до 10 мм, обладающих пористостью и водопрочностью. Такая структура обуславливает наиболее благоприятный водно-воздушный режим почвы.

Внесение биочара под вспашку способствует улучшению структурного состояния пахотного слоя почвы (рисунок 3). Так, если на контрольном варианте без внесения биочара содержание агрономически ценных агрегатов в пахотном слое составило в 2022 году под соей - 57%, в 2023 году под рисом - 44% и в 2024 году под яровой пшеницей - 61%, то на варианте с внесением максимальной дозы биочара (20 т/га) этот показатель достиг соответственно 82%, 68% и 82%, что соответствует хорошему и отличному агрегатному состоянию почвы. При этом в 2022 и 2024 годы эффективность внесения доз биочара 15 и 20 т/га на структурное состояние почвы была примерно равной.

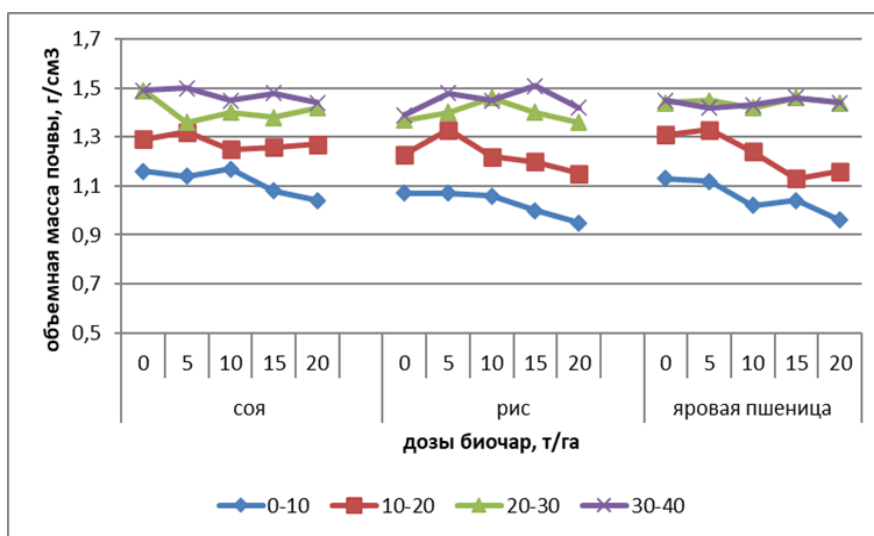


Рисунок 2 – Динамика объемной массы рисово-болотной почвы под посевами сои, риса и яровой пшеницы в зависимости от действия и последействия доз внесения биочара

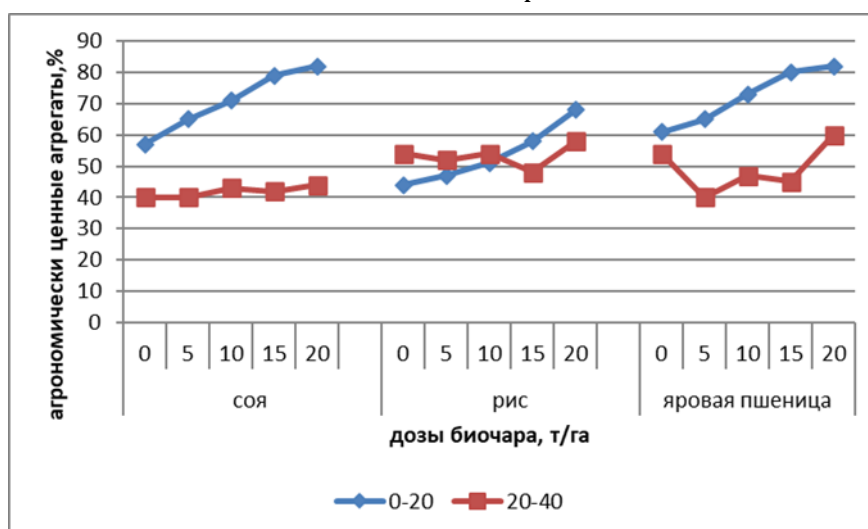


Рисунок 3 – Динамика агрономически ценных агрегатов рисово-болотной почвы под посевами сои, риса и яровой пшеницы в зависимости от действия и последействия доз внесения биочара

Внесение биочара под вспашку не оказывает существенного влияния на структурное состояние подпахотного слоя почвы (20-40 см). Повышение или снижение содержания агрономически ценных агрегатов почвы в этом горизонте почвы не существенно, находится в пределах ошибки опыта.

В наших опытах, как видно из рисунка 4, внесение биочара в дозах 15-20 т/га способствовало повышению содержания водопрочных агрегатов в

пахотном слое. Так, под соей в год действия этот показатель увеличился на 58-63%, под рисом во втором году последействия - на 28-52%, а под яровой пшеницей в третьем году последействия - на 55% по сравнению с контрольным вариантом без внесения биочара. Кроме того, отмечено положительное действие и последействие биочара на содержание водопрочных агрегатов и в подпахотном слое почвы (20-40 см).

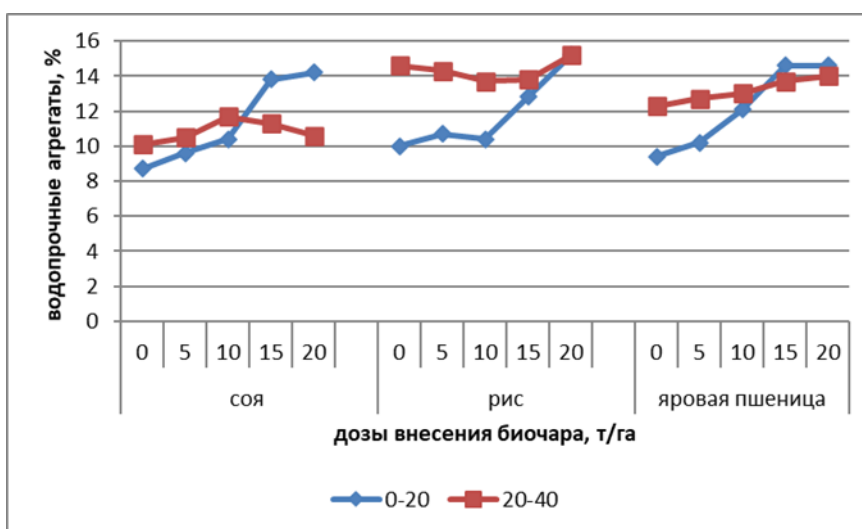


Рисунок 4 – Динамика содержания водопрочных агрегатов под посевами сои, риса и яровой пшеницы, в зависимости от действия и последействия доз внесения биочара

Внесение биочара под вспашку оказывает существенное влияние на содержание органического вещества, что имеет важное значение для восстановления плодородия рисово-болотных почв зоны рисосеяния, бедных органическим веществом. Увеличение содержания гумуса наблюдается преимущественно в пахотном слое этих почв (таблица 2).

При содержании под культурой сои в слое почвы 0-20 см контрольного варианта опыта 0,86% гумуса, на вариантах с внесением 10-20 т/га биочара содержание гумуса достигает 0,90-1,01%, что указывает на достоверное повышение органического вещества.

Тенденции увеличения в подпахотном слое (20-40 см) содержания гумуса на вариантах с внесением высоких доз биочара можно объяснить возможным вымыванием их растворимых частиц в нижние слои почвы.

Что касается лабильного гумуса, его содержание, вопреки ожиданиям, как в пахотном, так и подпахотном слое почвы под культурой сои существен-

ным образом не зависит от действия биочара в год внесения. Отмечается достоверное увеличение его содержания, как в пахотном, так и подпахотном слое почвы от последействия биочара под рисом и яровой пшеницей.

Внесение биочара не оказывает существенного влияния на содержание легкогидролизуемого азота как в прямом действии, так и в последействии. На вариантах с внесением биочара содержание нитратов в слое почвы 0-20 см в год внесения под соей колебалось в пределах 22,3-56,2 мг/кг почвы, против 87,1 на контроле. При этом, чем выше доза внесенного биочара, тем ниже содержание нитратов в пахотном слое почвы под посевами сои. Содержание подвижного фосфора в почве не зависело существенно от внесения биочара. В то же время отмечено уменьшение обменного калия в рисово-болотной почве на вариантах с внесением биочара - наиболее существенно на вариантах с внесением высоких его доз при возделывании сои и риса.

Таблица 2 – Агрохимические свойства почв под посевами сои, риса и яровой пшеницы в зависимости от сроков и доз внесения биочара

Дозы внесения биочара	Глубина, см	Общий гумус, %	Лабильный гумус, мг/кг	Легко-гидролизуемый азот, мг/кг	NO ₃ , мг/кг	P ₂ O ₅ , мг/кг	K ₂ O, мг/кг
Соя (2022 действие биочара - первый год)							
0	0-20	0,86±0,05	196±10	92,4±6,4	87,1±3,9	21,4±1,2	320±15
	20-40	0,62±0,03	182±11	75,6±3,0	45,7±2,1	20,3±1,3	227±12
5 т/га	0-20	0,87±0,03	203±12	90,6±4,5	56,2±2,5	20,6±1,4	300±16
	20-40	0,61±0,03	174±14	82,3±4,9	30,2±1,2	20,2±0,8	212±10
10 т/га	0-20	0,90±0,05	206±14	85,4±3,8	40,4±2,0	20,4±1,5	251±10
	20-40	0,60±0,02	185±7	70,3±3,9	17,7±0,7	22,1±1,1	180±9
15 т/га	0-20	0,94±0,05	208±19	72,8±2,7	36,6±2,2	23,7±1,8	191±8
	20-40	0,68±0,02	177±12	67,2±3,0	21,8±1,1	18,8±0,8	191±9
20 т/га	0-20	1,01±0,06	212±16	95,3±6,6	22,3±1,1	23,4±1,8	164±10
	20-40	0,73±0,02	189±11	74,2±3,3	15,2±0,7	19,2±0,6	144±7
Рис (2023 последствие биочара - второй год)							
0	0-20	0,82±0,05	154±6	76,6±3,5	71,2±2,6	32,3±2,0	256±9
	20-40	0,64±0,04	143±6	63,7±2,2	54,4±2,4	24,2±0,8	201±6
5 т/га	0-20	0,78±0,04	167±6	80,4±3,1	76,6±2,8	30,0±1,3	243±11
	20-40	0,66±0,03	159±5	52,3±4,2	43,2±1,6	20,8±0,9	188±8
10 т/га	0-20	0,88±0,03	167±10	69,6±3,5	70,3±3,2	30,1±2,2	266±15
	20-40	0,70±0,06	160±11	50,4±2,1	36,7±1,7	25,5±1,3	200±10
15 т/га	0-20	0,92±0,06	206±12	72,4±4,3	32,4±1,4	33,4±2,4	217±9
	20-40	0,73±0,06	172±12	78,0±4,1	30,9±1,0	27,2±1,1	228±12
20 т/га	0-20	1,05±0,08	208±14	63,2±2,1	34,3±1,5	35,2±2,0	239±12
	20-40	0,72±0,04	183±10	60,6±2,7	41,2±2,1	20,6±0,8	188±9
Яровая пшеница (2024 последствие биочара - третий год)							
0	0-20	0,73±0,04	164±8	73,4±2,9	46,2±2,1	30,1±2,2	300±17
	20-40	0,54±0,03	168±8	54,2±2,1	57,3±2,8	22,5±1,5	224±12
5 т/га	0-20	0,80±0,04	182±8	69,5±3,6	50,2±3,3	33,6±1,3	286±12
	20-40	0,61±0,02	156±6	60,6±2,1	61,4±3,0	22,9±1,0	235±9
10 т/га	0-20	0,96±0,06	178±6	66,2±2,0	42,9±1,3	28,3±1,7	290±14
	20-40	0,66±0,03	162±4	52,1±2,8	56,6±2,4	25,6±1,7	252±11
15 т/га	0-20	0,93±0,05	170±5	70,3±3,3	47,7±2,1	30,1±1,2	305±15
	20-40	0,58±0,02	142±3	63,6±3,9	52,2±3,3	22,0±0,8	240±9
20 т/га	0-20	0,98±0,05	193±7	58,4±3,3	50,3±1,4	33,3±2,0	287±16
	20-40	0,74±0,05	154±4	52,2±2,2	65,9±2,5	21,6±1,1	259±12

Внесение под основную обработку почвы биочара в дозах 15-20 т/га способствует улучшению объемной массы, повышению содержания агрономически ценных и водопрочных агрегатов пахотного слоя почвы. Наблюдается существенное увеличение содержания лабильного гумуса, подвижного фосфора. Улучшение агрофизических и агрохимических свойств деградирован-

ных почв, в конечном счете, приводит к повышению продуктивности культур рисового севооборота за счет действия и последствия вносимого биочара под отвальную вспашку. Урожайность риса и яровой пшеницы повышается в основном за счет повышения продуктивности кущения, сои – дополнительного бобообразования (таблица 3).

Таблица 3 – Урожайность культур при капельном орошении в зависимости от способов и доз внесения биочара

Дозы внесения биочара	Урожайность, т/га			Сумма урожая культур за 3 года, т/га	± прибавка
	соя	рис	яровая пшеница		
Без биочара (контроль)	1,54	2,73	2,76	7,03	-
Биочар 5 т/га	1,77	2,45	2,81	7,03	-
Биочар 10 т/га	2,03	2,90	3,44	8,37	+1,34
Биочар 15 т/га	3,06	3,64	3,87	10,57	+3,54
Биочар 20 т/га	3,02	3,63	4,06	10,71	+3,68
НСР _{0,05} , т/га	0,21	0,36	0,52		

Как видно из данных таблицы 4, применение биочара в зависимости от доз внесения способствует повышению урожайности сои на 0,16-1,48 т/га или на 10-96%, риса шалы на 0,17-0,97 т/га или на 6-36%, яровой пшеницы на 0,05-1,8 т/га или 2-65%. В целом за 3 года применение биочара обеспечивает получение 1,34-3,68 т дополнительного зерна риса, пшеницы и сои в суммарном виде (таблица 4).

Таблица 4 – Структура урожая зерновых культур в зависимости от способов и доз внесения биочара

Дозы внесения биочара, т/га	Количество растений, шт/м ²		Продуктивная кустистость		Озерненность, шт		Масса 1000 зерен, г	
	рис	яровая пшеница	рис	яровая пшеница	рис	яровая пшеница	рис	яровая пшеница
0	152±8	186±13	1,64±0,10	1,42±0,09	45±3	35±3	32,1±1,6	34,5±1,0
5	165±11	204±15	1,78±0,10	1,50±0,10	46±3	35±3	30,9±1,0	33,3±1,0
10	143±9	177±12	1,88±0,09	1,63±0,11	49±3	39±4	34,2±1,5	34,0±1,3
15	160±10	196±12	2,01±1,11	1,77±0,11	43±2	39±3	37,8±1,7	34,9±1,3
20	158±7	188±12	1,82±0,09	1,64±0,08	41±2	40±5	40,0±1,9	34,5±1,5

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Необходимо провести дополнительные исследования по изучению влияния различных доз биочара на качество почв и сохранение влаги.

В засушливых регионах необходимы испытания, включающие воздейст-

вие различных размеров и скоростей биочара, чтобы помочь сбалансировать полезность этого потенциального источника органического вещества почвы без какого-либо негативного побочного эффекта, такого как повышенная засоленность почвы.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена по проекту: «Агробиологические исследования по изучению аэробного риса для внедрения в культуру орошаемого земледелия Казахстана», ИРН AP19676592.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Саркулова Ж.С. Влияние горнометаллургических предприятий на почвенно-экологические функции и методы реабилитации загрязненных почв г. Риддер ВКО: дис. ... доктора философии (PhD). – Алматы, 2019. – 144 с.
2. Керимкулова М.Р., Мансуров А., Ошакбаева Ж.О., Наушабаев А.Х., Керимкулова А.Р. Синтез, свойства и применение биоугля// Химический журнал Казахстана. – 2017. – № 4. – С. 189–196.
3. Smith, P.; Gregory, P.J. Climate change and sustainable food production// Proc. Nutr. Soc. – 2013. – Vol. 72. – P. 21–28.
4. Zhang J., You C. Water Holding Capacity and Absorption Properties of Wood Chars. EnergyFuels// Energy Fuels. – 2013. – Vol. 27. – P. 2643–2648.
5. Akhtar S.S., Li G., Andersen M.N., Liu F. Biochar enhances yield and quality of tomato under reduced irrigation// Agric. Water Manag. – 2014. – Vol. 138. – P. 37–44.
6. Kinney T.J., Masiello C.A., Dugan B., Hockaday W.C., Dean M.R., Zygourakis K., Barnes R.T. Hydrologic properties of biochars produced at different temperatures// Biomass Bioenergy. – 2012. – Vol. 41. – P. 34–43.
7. Gray M., Johnson M., Dragila M.I., Kleber M. Water uptake in biochars: The roles of porosity and Hydrophobicity// Biomass Bioenergy. – 2014. – Vol. 61. – P. 196–205.
8. Montanarella L., Lugato E. The Application of Biochar in the EU: Challenges and Opportunities, Review// Agronomy. – 2013. – P. 462–473.
9. Field J.L., Keske C.M., Birch G.L., Defoort M.W., Cotrufo M.F. Distributed biochar and bioenergy coproduction: a regionally specific case study of environmental benefits and economic impacts// GCB Bioenergy. – 2013. – Vol. 5. – P. 177–191.
10. Glover J.D., Reganold J.P., Bell L.W., Borevitz J., Brummer E.C., Buckler, E.S., Cox C.M., Cox T.S., Crews T.E., Culman S.W. et al. Increased food and ecosystem security via perennial grains// Science. – 2010. – Vol. 328. – P. 1638–1639.
11. Методика Государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур. – Алматы, 2002. – 378 с.
12. Руководство по контролю и обработке наблюдений за фазами развития сельскохозяйственных культур. – 1982. – 150 с.
13. Наследие И.В. Тюрина в современных исследованиях в почвоведении: материалы Международной научной конференции (Казань, 15–17 октября 2013 г.). – Казань : Изд-во «Отечество», 2013. – 171 с.
14. ГОСТ 26213-91. Почвы. Методы определения органического вещества.
15. ГОСТ 26951-86. Почвы. Определение нитратов ионометрическим методом.
16. ГОСТ 26205-91. Почвы. Определение подвижных соединений фосфора и калия по методу Мачигина в модификации ЦИНАО.
17. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). – 5-е изд., доп. и перераб. – М.: Агропромиздат, 1985. – 351 с.

REFERENCES

1. Sarkulova Zh. S. Vlijanie gornometallurgicheskikh predpriyatij na pochvenno-jekologicheskie funkicii i metody rehabilitacii zagrjaznennyh pochv g. Ridder VKO: dissertacija na soiskanie stepeni doktora filosofii (PhD). – Almaty, 2019. – 144 s.
2. Kerimkulova M.R., Mansurov A., Oshakbaeva Zh.O., Naushabaev A.H., Kerimkulova A.R. Sintez, svojstva i primenenie biouglja// Himicheskij zhurnal Kazahstana. – 2017. – № 4. – S. 189–196.

3. Smith, P.; Gregory, P.J. Climate change and sustainable food production// Proc. Nutr. Soc. – 2013. – Vol. 72. – P. 21–28.
4. Zhang J., You C. Water Holding Capacity and Absorption Properties of Wood Chars// Energy Fuels. – 2013. – Vol. 27. – P. 2643–2648.
5. Akhtar S.S., Li G., Andersen M.N., Liu F. Biochar enhances yield and quality of tomato under reduced irrigation// Agric. Water Manag. – 2014. – Vol. 138. – P. 37–44.
6. Kinney T.J., Masiello C.A., Dugan B., Hockaday W.C., Dean M.R., Zygourakis K., Barnes R.T. Hydrologic properties of biochars produced at different temperatures// Biomass Bioenergy. – 2012. – Vol. 41. – P. 34–43.
7. Gray M., Johnson M., Dragila M.I., Kleber M. Water uptake in biochars: The roles of porosity and Hydrophobicity// Biomass Bioenergy. – 2014. – Vol. 61. – P. 196–205.
8. Montanarella L., Lugato E. The Application of Biochar in the EU: Challenges and Opportunities// Agronomy. – 2013. – P. 462–473.
9. Field J.L., Keske C.M., Birch G.L., Defoort M.W., Cotrufo M.F. Distributed biochar and bioenergy coproduction: a regionally specific case study of environmental benefits and economic impacts// GCB Bioenergy. – 2013. – Vol. 5. – P. 177–191.
10. Glover J.D., Reganold J.P., Bell L.W., Borevitz J., Brummer E.C., Buckler, E.S., Cox C.M., Cox T.S., Crews T.E., Culman S.W. et al. Increased food and ecosystem security via perennial grains// Science. – 2010. – Vol. 328. – P. 1638–1639.
11. Metodika Gosudarstvennogo sortoispytaniya sel'skohozjajstvennyh kul'tur. Almaty, 2002. – 378 s.
12. Rukovodstvo po kontrolju i obrabotke nabljudenij za fazami razvitija sel'skohozjajstvennyh kul'tur. – 1982. – 150 s.
13. Nasledie I.V. Tjurina v sovremennyh issledovanijah v pochvovedenii: Materialy Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii (Kazan', 15-17 oktjabrja 2013 g.). – Kazan': Izd-vo - Otechestvo.- 2013. – 171 s.
14. GOST 26213-91. Pochvy. Metody opredelenija organicheskogo veshhestva.
15. GOST 26951-86. Pochvy. Opredelenie nitratov ionometricheskim metodom.]
16. GOST 26205-91. Pochvy. Opredelenie podvizhnyh soedinenij fosfora i kalija po metodu Machigina v modifikacii CINAО.
17. Dosphehov B.A. Metodika polevogo opyta (s osnovami statisticheskoy obrabotki rezul'tatov issledovanij). – 5-e izd., dop. i pererab. – M.: Agropromizdat, 1985. – 351 s.

ТҮЙІН

Ж. Оспанбаев^{1,2}, А.С. Досжанова^{1*}, А.С. Сембаева^{1,2}, К.А. Мырзабек¹,

Н.А. Сатуллаев¹

ҚАЗАҚСТАННЫҢ ОҢТҮСТІК-ШЫҒЫСЫНДАҒЫ ТОЗҒАН СУАРМАЛЫ ЖЕРЛЕРДЕ
БИОЧАР ЕНГІЗУДІҢ ТИІМДІЛІГІ

¹«Қазақ ұлттық аграрлық зерттеу университеті» КЕАҚ, 050010, Алматы,
Абай даңғылы, 8, Қазақстан, *e-mail: ainurdoszhanova@mail.ru

²«Қазақ егіншілік және өсімдік шаруашылығы ғылыми-зерттеу институты»
ЖШС, 040909, Алматы облысы, Алмалыбақ, Ерленесов көшесі, 1, Қазақстан

Мақалада Қазақстанның оңтүстік-шығысындағы Ақдала суармалы массивінің тозған күріш-батпақты топырақтарының агрофизикалық және агрохимиялық қасиеттеріне қайың биочарының әртүрлі дозаларының әсерін зерттеу бойынша далалық зерттеулердің нәтижелері келтірілген. Қолдану дозаларына байланысты биочарды қолдану майбұршақ өнімділігін 0,16-1,48 т/га немесе 10-96%-ға, күрішті 0,17-0,97 т/га немесе 6-36% - ға,

жаздық бидайды 0,05-1,8 т/га немесе 2-65% - ға арттыруға ықпал етті. Жалпы, 3 жыл ішінде биочарды қолдану 1,34-3,68 тонна қосымша күріш, бидай және майбұршақ дәндерін жиынтық түрінде алуды қамтамасыз етті. Топырақты негізгі өңдеу кезінде биочарды 15-20 т/га дозада енгізу топырақтың көлемдік массасының жақсаруына, топырақ қабатының агрономиялық құнды және су өткізгіш агрегаттарының құрамын арттыруға ықпал етеді.

Түйінді сөздер: күріш-батбақты топырақ, биочар, суармалы егіншілік, күріш, жаздық бидай, майбұршақ, тұздану, өнімділік.

SUMMARY

Zh. Ospanbayev^{1,2}, A.S. Doszhanova^{1*}, A.S. Sembayeva^{1,2}, K.A. Myrzabek¹, N.A. Satullayev¹
EFFECTIVENESS OF BIOCHAR ON DEGRADED IRRIGATED SOILS IN SOUTHEAST
KAZAKHSTAN

¹*Kazakh National Agrarian Research University, 050010, Almaty, Abay st. 8,
Kazakhstan, *e-mail: ainurdoszhanova@mail.ru*

²*Kazakh Research Institute of Agriculture and Plant Growing, 040909, Almaty region,
Almalybak, Yerlepesova st. 1, Kazakhstan*

The article presents the results of field studies on the effect of various doses of birch biochar on the agrophysical and agrochemical properties of degraded irrigated rice-march soil of the Akdalinsky irrigation massif of southeastern Kazakhstan. The use of biochar, depending on the application doses, increases the yield of soybeans by 0.16-1.48 t/ha or by 10-96%, rice by 0.17-0.97 t/ha or by 6-36%, spring wheat by 0.05-1.8 t/ha or 2-65%. In general, over 3 years, the use of biochar provides 1.34-3.68 tons of additional grains of rice, wheat and soybeans in total. The introduction of biochar in doses of 15-20 t/ha for basic tillage helps to improve the bulk, increase the content of agronomically valuable and durable aggregates of the arable soil layer.

Keywords: rice-marsh soils, biochar, irrigated agriculture, rice, spring wheat, soybeans, salinization, yield.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

1. Оспанбаев Жумагали - главный научный сотрудник, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6570-8339>, e-mail: zhumagali@mail.ru

2. Досжанова Айнур Серикбайқызы - ассоциированный профессор кафедры «Агрономии, селекции және биотехнологии», кандидат сельскохозяйственных наук, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9157-1022>, e-mail: ainurdoszhanova@mail.ru

3. Сембаева Айзада Сансызбаевна - научный сотрудник, магистр сельскохозяйственных наук, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5808-0080>, e-mail: sembaeva.a84@mail.ru

4. Мырзабек Карима Аймаханқызы - ассоциированный профессор кафедры «Агрономии, селекции и биотехнологии», кандидат сельскохозяйственных наук, ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0009-2888-813X>, e-mail: myrzabek.karima@yandex.ru

5. Сатуллаев Нурсултан Асетуллаевич - магистрант кафедры «Агрономии, селекции и биотехнологии», ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0588-6659>, e-mail: satullaevnursultan945@gmail.com

FTAMP: 87.21.81

DOI: 10.51886/1999-740X_2025_4_16

М.Р. Керимкулова¹, Г.Н. Қасымжанова^{2*}, Е.О. Досжанов^{2,3},**А.Р. Керимкулова^{3,4}, А.Н. Жумажанов^{2,3}, Н.М. Асанбек^{2,3}****НАНОҚҰРЫЛЫМДЫ СОРБЕНТТЕР КӨМЕГІМЕН
АУЫР МЕТАЛДАРМЕН ЛАСТАНҒАН ТОПЫРАҚТЫ БАҚЫЛАУ ЖӘНЕ ТАЗАЛАУ
ӘДІСІН ӘЗІРЛЕУ**

¹Қазақ ұлттық аграрлық зерттеу университеті, 050010, Алматы,
Абай даңғылы, 8, Қазақстан

²Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, 050040, Алматы,
Әл-Фараби даңғылы, 71, Қазақстан, *e-mail: kasymzhanova2002@inbox.ru

³Жану проблемалары институты, 050015, Алматы,
Бөгенбай батыр көшесі, 172, Қазақстан

⁴Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті,
050013, Алматы, Сәтбаев көшесі, 22, Қазақстан

Аңдатпа. Бұл зерттеу жұмысында ауыр металдармен ластанған топырақты өсімдік қалдықтарынан жасалған наноқұрылымды сорбенттермен тазалау мүмкіндігі қарастырылған. Зерттеу нысаны ретінде Алматы, Семей, Ақтау және Риддер қалаларынан топырақ үлгілері алынған, оларға күріш қауызы, қарағай бүршігі және күнбағыс қауызыдарынан жасалған биосорбенттермен сорбция процесі жүргізілді. Сорбенттерді 800°C температурада аргон атмосферасында көміртектендіру арқылы дайындалған үлгілерге физика-химиялық зерттеулер (сканирлеуші электронды микроскопия СЭМ, Брунауэр-Эммет-Теллер (ВЕТ), рентген-флуоресцентті талдау РФТ) жүргізілді. Нәтижелер сорбенттердің жоғары кеуектілікке және дамыған беткі қабатқа ие екенін, бұл олардың адсорбциялық қабілетін арттыратынын көрсетті. 5 күндік адсорбция тәжірибелері бойынша марганец (Mn) және рубидий (Rb) ауыр металдары барлық сорбенттермен тиімді сорбцияланды (30-70 %). Бұл ретте күнбағыс қауызы рубидийді, қарағай бүршіктері марганец пен стронцийді, ал күріш қауызы темір мен рубидийді тиімді сіңіретінін көрсетті. Алынған нәтижелер өсімдік қалдықтарынан алынған көміртекті наносорбенттердің ауыр металдармен ластанған топырақты тиімді тазартуға қабілетті екенін және оларды экологиялық тұрғыдан қауіпсіз физико-химиялық әдісі ретінде қолдануға жарамды екенін көрсетеді.

Түйінді сөздер: биосорбент, ауыр металл, топырақ, көміртектендіру, наноқұрылымды сорбент.

КІРІСПЕ

Топырақтардың ауыр металдармен ластануы, Қазақстан үшін аса маңызды жаһандық экологиялық проблемалардың бірі болып табылады. Сарапшылардың бағалауы бойынша, әлемдегі 10 миллионнан астам ластанған аумақтардың 50% - дан астамында тұрақты ауыр металдар бар [1, 2]. Мұндай учаскелер металдардың жоғары концентрациясымен және экожүйелердің деградациясымен сипатталатын "brownfields" ("қоңыр аймақтар") деп

аталады. Қазақстанда қарқынды индустрияландыру және XX ғасырда экологиялық бақылаудың жеткіліксіздігі бірқатар өнеркәсіптік өңірлерде ауыр металдардың жинақталуына себеп болды [3]. Мәселен, Алматыда тау бөктеріндегі ойпатта орналасқан ірі мегаполис-Көлік және өнеркәсіп шығарындыларымен байланысты топырақта қорғасын, мырыш және мыстың едәуір жинақталуы тіркеледі [4]. Топырақтың ауыр металдармен ластану көздері жаһандық ауқымда пайдалы қазбалар-

ды өндіру және өңдеу, металлургия, ауыл шаруашылығы (тыңайтқыштар, пестицидтер), сондай-ақ қалдықтарды кәдеге жарату ережелерін сақтамау болып табылады, бұл осы элементтердің топырақ ортасына түсуіне және ұзақ уақыт бекітілуіне әкеледі [5].

Дәстүрлі әдістердің кейбірі (мысалы, тұрақтандыру) топырақтың құрылымы мен құнарлылығын сақтауға мүмкіндік берсе де, жағдайда қымбат немесе тиімсіз болуы мүмкін. Сондықтан, соңғы жылдары ауыр металдармен ластанған топырақтарды залалсыздандыру үшін адсорбциялық әдістерге, атап айтқанда биосорбенттерді қолдануға үлкен көңіл бөлінуде [5].

Биосорбенттер - қоршаған ортадан ластаушы заттарды сіңіруге және бекітуге қабілетті материалдар (өсімдік қалдықтары, ауылшаруашылық жанама өнімдері және т.б.). Оларды пайдалану экономикалық орындылығымен, қол жетімділігімен және экологиялық қауіпсіздігімен сипатталады. Ауыл шаруашылығы қалдықтарынан алынған көміртекті сорбенттер (биочар) ерекше қызығушылық тудырады, олар су мен топырақтан ауыр металдарды шығаруда жоғары тиімділікті көрсетеді [6, 7]. Сорбция механизмдеріне кеуекті құрылымдағы физикалық адсорбция, катион алмасуы, сондай-ақ сорбент бетіндегі функционалдық топтармен өзара әрекеттесу жатады.

Өсімдік қалдықтарынан сорбенттерді алу қажет емес биомассаны пайдалану арқылы қоршаған ортаны тазартудың тиімді әдісі болып табылады. Ауыр металдармен ластанған топырақты тазалауда перспективалық шикізаттар ретінде күріш, күнбағыс қауызы, үгінділер, жаңғақ қабығы, қарағай бүршігі және басқада көміртегіге бай материалдар қолданылады [8-11]. Олардан әдетте көміртектену процесіне ұшырау нәтижесінде, белсендірілген көмірге ұқсас дамыған кеуекті құрылымы бар материал пайда болады [12].

Топырақтың ауыр металдармен, оның ішінде Қазақстанның өнеркәсіптік өңірлерінде ластануының жоғары таралуын ескере отырып, қолжетімді және экологиялық қауіпсіз биосорбенттерді қолдану физико-химиялық перспективалық әдісі ретінде қарастырылады.

МАТЕРИАЛДАР МЕН ӘДІСТЕР

Жұмыстың зерттеу нысаны ретінде Ақтау, Семей, Алматы, Риддер қалаларының ауыр металдармен ластанған топырақтары алынып зерттелінді. Бұл топырақтардың таңдап алыну себебі – аталған қала топырақтарында ауыр металл мөлшері көп және оны тазалау үшін наноқұрылымды биосорбенттер (күріш қауызы, қарағай жаңғағы және күнбағыс қауызы) пайдаланылады. Топырақтардың элементтік құрамы 1-4 кестеде көрсетілген.

Кесте 1 - Алматы қаласының топырақ үлгілерінің рентген-флуоресцентті талдау құрамы

Элемент	Мөлшері, масс. %	Инт, cps
Темір (Zn)	55,85	439,1
Марганец (Mn)	0,532	3,8
Мырыш (Zn)	0,455	2,2
Мыс (Cu)	0,363	1,7
Стронций (Sr)	1,43	5,9
Титан (Ti)	1,14	6,1
Рубидий (Rb)	1,06	4,6

Кесте 2 - Семей қаласының топырақ үлгілерінің рентген-флуоресцентті талдау құрамы

Элемент	Мөлшері, масс. %	Инт, cps
Темір (Zn)	66,74	482,3
Марганец (Mn)	0,80	5,7
Мырыш (Zn)	0,61	2,4
Мыс (Cu)	0,2	0,47
Стронций (Sr)	3,79	13,1
Титан (Ti)	1,07	5,9
Рубидий (Rb)	0,24	0,86
Хром (Cr)	0,16	1,4

Кесте 3 - Ақтау қаласының топырақ үлгілерінің рентген-флуоресцентті талдау құрамы

Элемент	Мөлшері, масс. %	Инт, cps
Темір (Zn)	44,16	378,2
Марганец (Mn)	0,53	94,2
Стронций (Sr)	0,98	5,3
Титан (Ti)	1,47	7,4

Кесте 4 - Риддер қаласының топырақ үлгілерінің рентген-флуоресцентті талдау құрамы

Элемент	Мөлшері, масс. %	Инт, cps
Темір (Zn)	66,93	530,0
Марганец (Mn)	0,53	4,1
Мырыш (Zn)	1,47	6,2
Мыс (Cu)	0,40	1,7
Стронций (Sr)	0,10	0,37
Титан (Ti)	1,47	9,3
Рубидий (Rb)	0,38	1,5

Биосорбенттерді көміртектендіру процесін жүргізу үшін вертикальды пеш қолданылды. Биосорбент ретінде таңдап алынған 3 үлгіден арқайсысынан 130 г өлшеп алып, болат реакторға салып, вертикальды пеште 800°C температурада, аргон газын жіберу арқылы инертті ортада 120 минут көміртектендірілді. Содан кейін алынған сорбенттер бөлме температурасына дейін суытылды.

Карбонизациядан кейін алынған көміртекті сорбентті бірнеше рет дистилденген сумен жуылып, жуу процесі кезінде үлгілердің рН мәні бейтарап деңгейге (~7) жеткенге дейін жүргізіл-

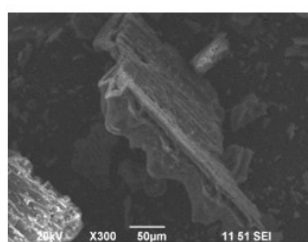
ді. Әр циклде үлгілер дистилденген сумен толтырылып, қыздыру арқылы қайнатылғаннан кейін су ауыстырылып отырды. Толық тазартылған үлгілерді кептіру шкафында 100°C температурада 12 сағат бойы кептірілді. Карбонизациядан кейін алынған құрғақ наноқұрылымды сорбенттерге физика-химиялық зерттеулер жүргізілді: морфологиясын анықтау үшін сканирлеуші электрондық микроскопия (СЭМ), меншікті беткі ауданын және кеуектілік сипаттамаларын бағалау үшін BET әдісі, сондай-ақ элементтік құрамын талдау үшін энергия-дисперсиялық спектралдық талдау (ЭДС) әдістері қолданылды.

НӘТИЖЕЛЕР ЖӘНЕ ОЛАРДЫ ТАЛҚЫЛАУ

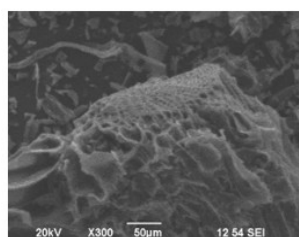
Сканерлеуші электронды-микроскопиялық талдау нәтижелері. 1-суретте (300 есе үлкейтілген) биосорбенттердің макроскопиялық беткі морфологиясы барлық үш биосорбенттің құрылымы күрделі, борпылдақ және талшықты сипатқа ие және бұл олардың жақсы дамыған беткі қабаты бар екенін көрсетеді. Беттік аймақта жарықшақтар мен кеуектердің болуы адсорбциялық

белсенділіктің жоғары болуына мүмкіндік жасайды.

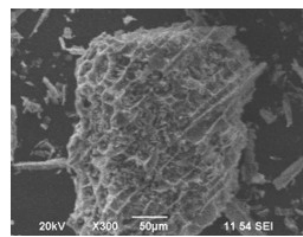
Биосорбенттердің 1000 есе үлкейтілген суреттерінде барлық үлгілерде жақсы дамыған кеуекті құрылымдар, арналар және жарықтар байқалып тұр. Бұл кеуектер мен арналар ауыр металл иондарын тиімді сіңіру үшін маңызды рөл атқарады. Кеуек диаметрінің әртүрлі болуы адсорбция процесінде металл иондарының бетке тартылуын жеңілдетуі мүмкін.



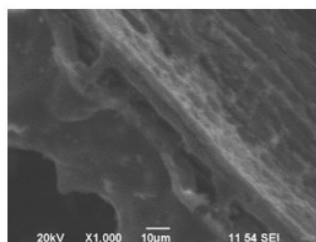
300 есе үлкейтілген
(Күріш қауызы)



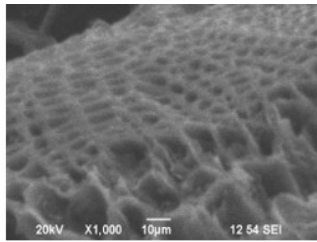
300 есе үлкейтілген
(Қарағай жаңғағы)



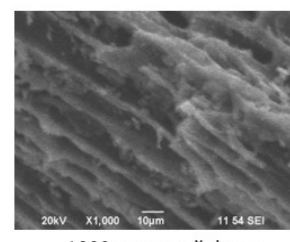
300 есе үлкейтілген
(Күнбағыс қауызы)



1000 есе үлкейтілген
(Күріш қауызы)



1000 есе үлкейтілген
(Қарағай жаңғағы)



1000 есе үлкейтілген
(Күнбағыс қауызы)

Сурет 1 - Күріш қауызы, қарағай жаңғағы және күнбағыс қауызының көміртектендіруден кейінгі түсірілген микросуреттері

Зерттелген материалдардың барлығының құрылымында жоғары меншікті беткі аумақты қамтамасыз ететін кеуекті аймақтар басым. Мұндай құрылым ауыр металдарды адсорбциялауға қолайлы жағдай туғызады, әрі алынған биосорбенттердің экологиялық тазарту үдерістерінде тиімді болатынын көрсетеді.

Брунауэр-Эммет-Теллер әдісінің талдау нәтижелері (ВЕТ). 2-суретте көрсетілгендей ВЕТ көп нүктелі талдау нәтижесі бойынша күріш қауызы негі-

зіндегі үлгінің меншікті беткі ауданы $55.5918 \text{ м}^2/\text{г}$ құрайтыны анықталды. Бұл көрсеткіш материалдың жоғары адсорбциялық қасиетке ие екенін көрсетеді.

Берілген ВЕТ көпнүктелі талдау нәтижесі бойынша қарағай жаңғағы негізіндегі үлгінің меншікті беткі ауданы $66.5662 \text{ м}^2/\text{г}$ болып анықталды. Бұл мән үлгінің адсорбциялық қабілетінің жоғары екенін және оны тиімді сорбент ретінде қолдануға болатынын көрсетеді.

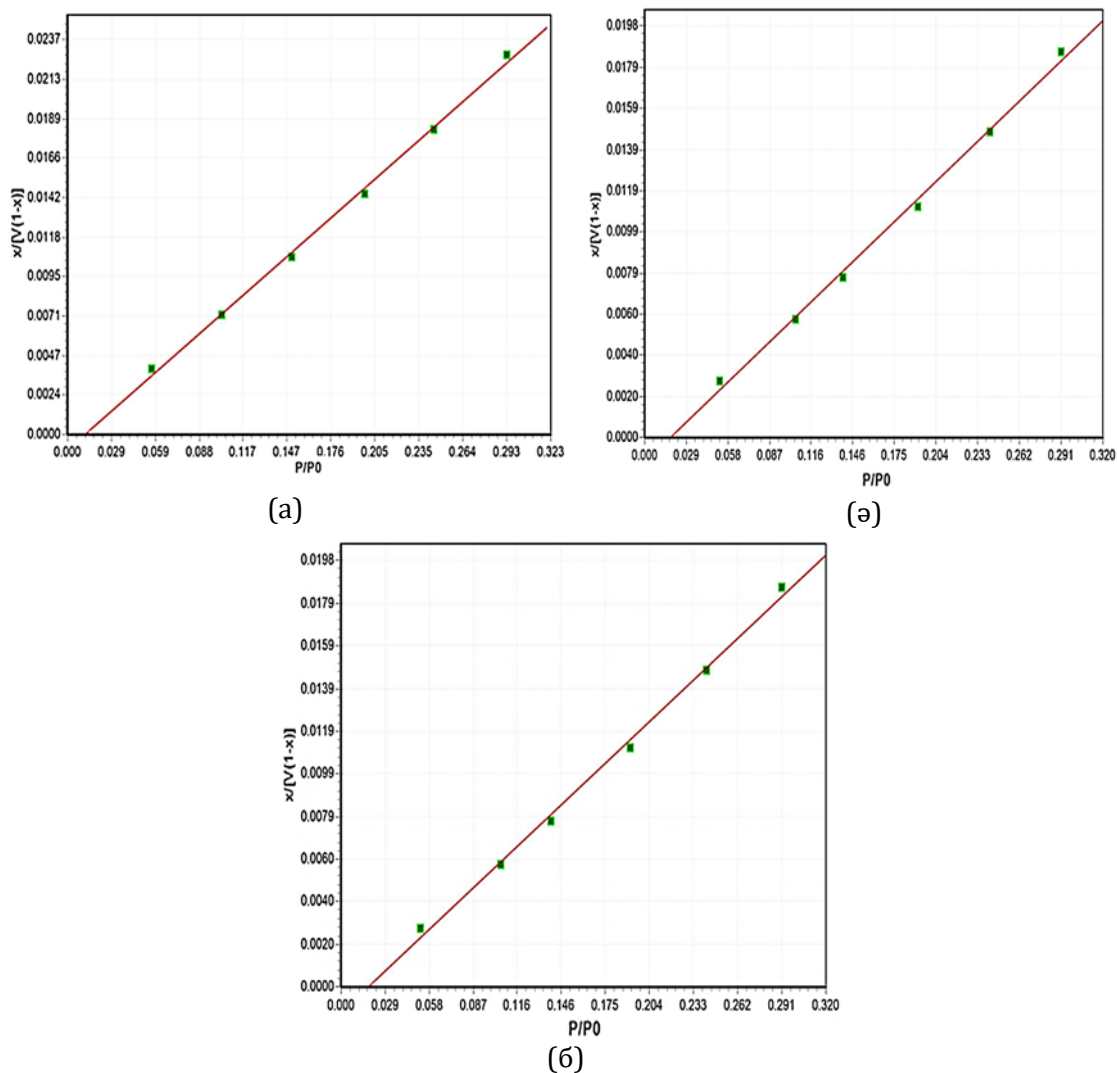
ВЕТ көпнүктелі талдау нәтижесі бойынша күнбағыс қауызы негізіндегі үлгінің меншікті беткі ауданы 83,0113 м²/г болып анықталды. Бұл көрсеткіш материалдың адсорбциялық белсенділігі жоғары екенін және тиімді сорбент ретінде пайдалануға болатынын дәлелдейді.

Әртүрлі биосорбенттердің ауыр металдарды сіңіру тиімділігі бойынша салыстыру.

3-суретте төрт қала (Алматы, Семей, Ақтау және Риддер) бойынша

ауыр металдардың сорбенттермен әртүрлі элементтерге (Fe, Mn, Ti, Sr, Rb) қатысты тазарту тиімділігі көрсетілген. Әр сорбенттің нақты элемент бойынша пайыздық тазалау тиімділігі диаграммаларда салыстырмалы түрде берілген.

Жүргізілген зерттеу нәтижесінде әртүрлі өсімдік қалдықтарынан жасалған сорбенттердің (күріш қауызы, қарағай бүршігі, күнбағыс қауызы) ауыр металдарды сорбциялау нәтижесін қалалар бойынша салыстыра қарағанда.



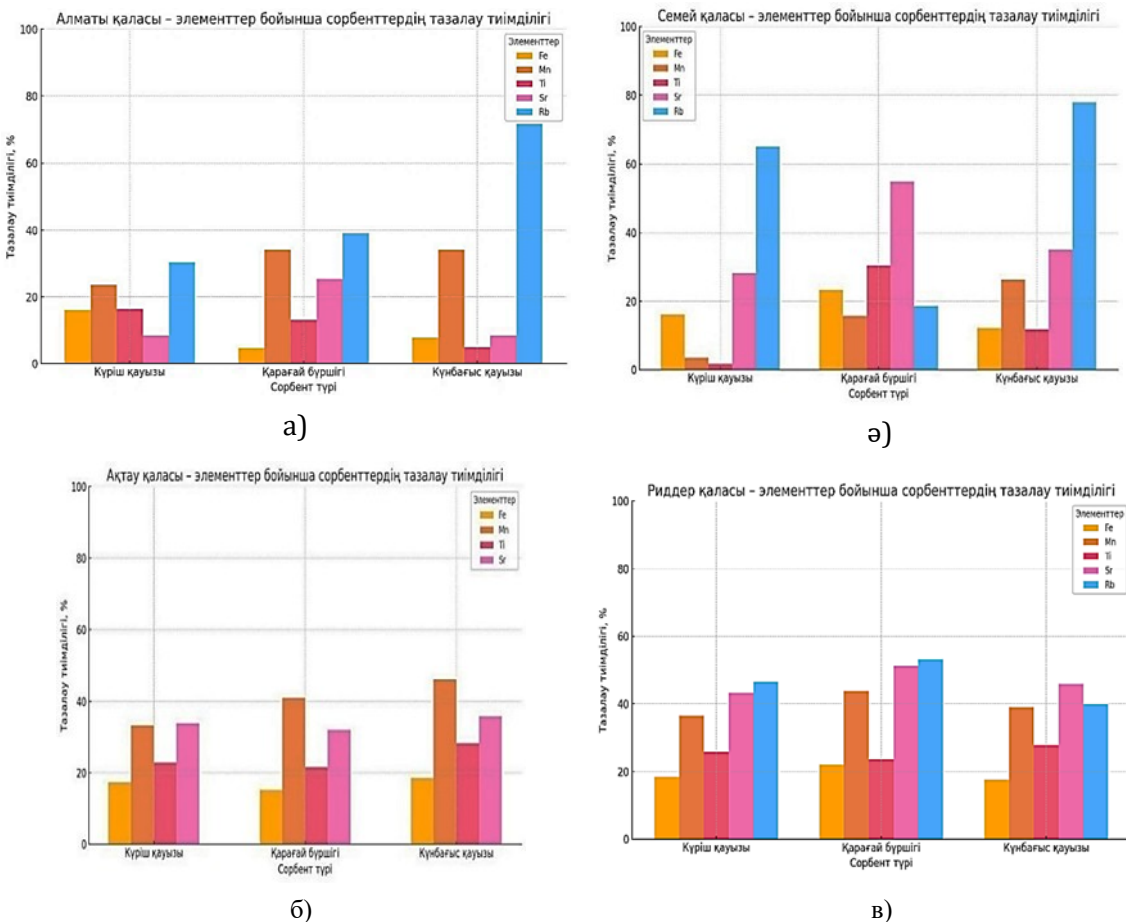
Сурет 2 - Күріш қауызы (а), қарағай бүршігі (ә) және күнбағыс қауызы (б) негізіндегі биосорбент үлгілерінің ВЕТ әдісі бойынша меншікті беттік ауданын анықтау нәтижелері

Семей мен Риддер қалаларында сорбенттер әсіресе темір мен титанды тиімді жойды; Алматы мен Ақтау қалаларында күріш қауызы және қарағай жаңғағы Sr және Mn иондарын жақсы сорбциялады; Күнбағыс қауызы кейбір қалаларда тұрақты, бірақ салыстырмалы түрде төмен нәтиже көрсетті.

Осылайша, зерттеу нәтижелері өсімдік тектес наноқұрылымды сорбенттердің нақты аймақтық ерекшеліктерді ескере отырып, ауыр металдармен ластанған топырақты тиімді тазарту үшін пайдалануға болатындығын дәлелдеді. Бұл тәсіл қоршаған ортаны қорғау, топырақты қалпына келтіру жә-

не экологиялық қауіпсіз агротехнологияларды енгізу тұрғысынан үлкен әлеуетке ие.

Марганец (Mn) және рубидий (Rb) элементтері барлық сорбенттермен тиімді сорбцияланды (жалпы тиімділік 30–70% аралығында). Күнбағыс қауызы рубидий иондарын адсорбциялауда ерекше жоғары нәтиже көрсетті (Алматыда 71.7% дейін). Қарағай жаңғағы стронций мен марганецті адсорбциялауда жақсы тиімділікке ие (40–50% аралығында). Күріш қауызы сорбенті орта есеппен 16–30% тиімділік көрсетіп, әсіресе рубидий (Rb) элементін сорбциялауда жоғары нәтиже берді.



Сурет 3 - Әртүрлі биосорбенттердің топырақтан ауыр металдарды тазарту тиімділігін салыстыру (Fe, Mn, Ti, Sr, Rb элементтері бойынша):

а) Алматы қаласы; ә) Семей қаласы; б) Ақтау қаласы; в) Риддер қаласы

ҚОРЫТЫНДЫ

Осы зерттеу жұмысында ауыр металдармен ластанған топырақты табиғи наноқұрылымды сорбенттермен (күріш қауызы, қарағай жаңғағы, күнбағыс қауызы) тазарту мүмкіндігі қарастырылды. Зерттеу нысаны ретінде Алматы, Семей, Ақтау және Риддер қалаларынан алынған топырақ үлгілері пайдаланылды.

РФТ нәтижелері топырақ құрамында темір (Fe), марганец (Mn), титан (Ti), стронций (Sr) және рубидий (Rb) элементтерінің басым екенін көрсетті. Кейбір аймақтарда олардың концентрациясы шекті рұқсат етілген деңгейден асып түскені анықталды, бұл экологиялық қауіптің бар екенін дәлелдейді.

СЭМ және ВЕТ талдау нәтижелері сорбенттердің жоғары кеуектілігі мен беткі ауданы олардың адсорбциялық қабілетін арттыратынын көрсетті 5 күндік адсорбция тәжірибесінде:

күнбағыс қауызы рубидийді тиімді сорбциялады;

қарағай жаңғағы марганец пен стронцийді сіңірді;

күріш қауызы темір мен рубидийді жоғары дәрежеде сорбциялады.

Жалпы алғанда, өсімдік қалдықтарынан алынған көміртекті наносорбенттер ауыр металдардан топырақты тиімді тазартуға қабілетті екені анықталды. Бұл әдісті топырақтың тазалауда қолдану экологиялық тұрғыдан орынды әрі болашағы зор шешім болып табылады.

ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ / REFERENCES

1. Cheng, S., Chen, T., Xu, W., Huang, J., Jiang, S., & Yan, B.. Application research of biochar for the remediation of soil heavy metals contamination: a review// *Molecules*. – 2020. – Vol. 25(14). – P. 3167.
2. Saparov, G., Dutbayev, Y., Amanzholkyzy, A., Islam, K. R., Tireuov, K., Hakimov, N., & Kozlov, A. Assessing Heavy Metal Contamination for Soil Reclamation: Implications for Sustainable Urban Development// *Journal homepage*.–2024. – Vol. 19(6). – P. 2197–2204.
3. Zhyrgalova, A., Yelemessov, S., Ablaihan, B., Aitkhozhayeva, G., & Zhildikbayeva, A. Assessment of potential ecological risk of heavy metal contamination of agricultural soils in Kazakhstan// *Brazilian Journal of Biology*. – 2024. – Vol. 84. – P. e280583.
4. Li, Z., Zheng, Z., Li, H., Xu, D., Li, X., Xiang, L., & Tu, S. Review on rice husk biochar as an adsorbent for soil and water remediation// *Plants*. – 2023. – Vol. 12(7). – 1524.
5. Ali, Qasim & Zia, Ahmed & Kamran, Muhammad & Shabaan, Dr-Muhammad & Zulfiqar, Usman & Ahmad, Muhammad & Iqbal, Rashid & Maqsood Muhammad. Nanoremediation for heavy metal contamination: A review// *Hybrid Advances*. – 2023. – Article 100091.
6. Emenike, E. C., Adeleke, J. A., Iwuozor, K. O., Egbemhenghe, A., Bello-Hassan, M. T., Adu, A. O., & Adeniyi, A. G. Application of Rice Husks-Based Biochar for Removal of Pollutants from Water and Wastewater// *Separation & Purification Reviews*. -2025.–P.1–22.
7. Igalavithana, A. D., Lee, S. E., Lee, Y. H., Tsang, D. C., Rinklebe, J., Kwon, E. E., & Ok, Y. S. Heavy metal immobilization and microbial community abundance by vegetable waste and pine cone biochar of agricultural soils// *Chemosphere*. – 2017. – Vol. 174. – P. 593–603.
8. Cecire, R., Diana, A., Giacomino, A., Abollino, O., Inaudi, P., Favilli, L., & Malandrino, M. Rice Husk as a Sustainable Amendment for Heavy Metal Immobilization in Contaminated Soils: A Pathway to Environmental Remediation// *Toxics*. P. – 2024. – Vol. 12(11). – 790.

9. Asadi, H., Ghorbani, M., Rezaei-Rashti, M., Abrishamkesh, S., Amirahmadi, E., Chengrong, C. H. E. N., & Gorji, M. Application of rice husk biochar for achieving sustainable agriculture and environment// Rice Science, – Vol. 28(4). – P. 325–343.

10. Duman, G., Onal, Y., Okutucu, C., Onenc, S., & Yanik, J. Production of activated carbon from pine cone and evaluation of its physical, chemical, and adsorption properties// Energy & fuels. – 2009. – Vol. 23(4). – P. 2197–2204.

11. Amar, M. B., Walha, K., & Salvadó, V. Valorisation of pine cone as an efficient biosorbent for the removal of Pb (II), Cd (II), Cu (II), and Cr (VI)// Adsorption Science & Technology. – 2021. – Article 6678530. .

12. Duwiejuah, A. B., Abubakari, A. H., Quainoo, A. K., & Amadu, Y. Review of biochar properties and remediation of metal pollution of water and soil// Journal of Health and Pollution. – 2020. – Vol. 10(27). – P. 200902.

РЕЗЮМЕ

М.Р. Керимкулова¹, Г.Н. Қасымжанова^{2*}, Е.О. Досжанов^{2,3},

А.Р.Керимкулова^{3,4}, А.Н. Жумажанов^{2,3}, Асанбек Н.М.^{2,3}

РАЗРАБОТКА МЕТОДА КОНТРОЛЯ И ОЧИСТКИ ПОЧВЫ, ЗАГРЯЗНЁННОЙ ТЯЖЁЛЫМИ МЕТАЛЛАМИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ СОРБЕНТОВ

¹Казахский национальный аграрный исследовательский университет,
050010, Алматы, пр. Абая, 8, Казахстан

²Казахский национальный университет имени аль-Фараби, 050040, Алматы,
пр. аль-Фараби, 71, Казахстан, *e-mail: kasymzhanova2002@inbox.ru

³Институт проблем горения, 050015, Алматы, ул. Богенбай батыра, 172,
Казахстан

⁴Казахский национальный исследовательский технический университет
им. И. Сатпаева, 050013, Алматы, ул. Сатпаева, 22, Казахстан

Данная исследовательская работа предусматривает возможность очистки загрязненных тяжелыми металлами почв наноструктурированными сорбентами из растительных остатков. В качестве объекта исследования были взяты образцы почвы городов Алматы, Семей, Актау и Риддер, а также проведен процесс сорбции биосорбентами из рисовой шелухи, сосновых почек и подсолнечника. Проведены физико-химические исследования (СЭМ, ВЕТ, РФА) образцов, приготовленных путем карбонизации сорбентов в атмосфере аргона при температуре 800°C. Результаты показали, что сорбенты обладают высокой пористостью и развитой поверхностью, что увеличивает их адсорбционную способность. В 5-дневных экспериментах по адсорбции марганец (Mn) и рубидий (Rb) были эффективно сорбированы всеми сорбентами (30-70%). При этом подсолнечная шелуха показала, что она эффективно поглощает рубидий, сосновые почки-марганец и стронций, а рисовая шелуха-железо и рубидий. Полученные результаты показывают, что углеродные наносорбенты, полученные из растительных остатков, способны эффективно очищать почвы, загрязненные тяжелыми металлами, и подходят для использования в качестве экологически безопасного физико-механического метода.

Ключевые слова: биосорбент, тяжёлые металлы, почва, карбонизация, наноструктурированный сорбент.

SUMMARY

M.R. Kerimkulova¹, G.N. Kassymzhanova^{2*}, Ye.O. Doszhanov^{2,3},

A.R. Kerimkulova^{3,4}, A.N. Zhumazhanov^{2,3}, N.M. Assanbek^{2,3}

DEVELOPMENT OF A METHOD FOR MONITORING AND REMEDIATING HEAVY METAL-CONTAMINATED SOIL USING NANOSTRUCTURED SORBENTS

¹*Kazakh National Agrarian Research University, 050010, Almaty, Abai ave., 8, Kazakhstan*

²*Al-Farabi Kazakh National University, 050040, Almaty, Al-Farabi ave., 71, Kazakhstan, *e-mail: kasymzhanova2002@inbox.ru*

³*Institute of Combustion Problems, 050015, Almaty, Bogenbay Batyr st., 172, Kazakhstan*

⁴*Satbayev University, 050013, Almaty, Satpayev st., 22, Kazakhstan*

This research work provides for the possibility of cleaning soils contaminated with heavy metals with nanostructured sorbents made from plant residues. As the object of the study, soil samples from Almaty, Semey, Aktau and Ridder were taken, and the process of sorption was carried out with biosorbents made from rice husks, Pine buds and sunflower husks. Physico-chemical studies (Sam, bat, RFA) were carried out on samples prepared by carbonization of sorbents in an argon atmosphere at a temperature of 800°C. The results showed that sorbents have a high porosity and a developed surface area, which increases their adsorption capacity. According to 5-day adsorption experiments, manganese (Mn) and rubidium (Rb) were effectively sorbed with all sorbents (30-70 %). At the same time, it was shown that sunflower husks effectively absorb rubidium, Pine buds-manganese and strontium, and rice husks-iron and rubidium. The results obtained show that carbon nanosorbents from plant residues are capable of effectively cleaning soils contaminated with heavy metals and are suitable for their use as an environmentally safe physico-mechanical method.

Keywords: biosorbent, heavy metals, soil, carbonization, nanostructured sorbent.

АВТОРЛАР ТУРАЛЫ АҚПАРАТ

1. Керимкулова Мақпал Рыскуловна – топырақтану және агрохимия кафедрасының докторанты, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5951-9160>, e-mail: biomak111@mail.ru

2. Касымжанова Гүлім – химиялық физика материалтану кафедрасының наноматериалдар және нанотехнологиялар мамандығының магистрі, ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0005-3760-7345>, e-mail: kasymzhanova2002@inbox.ru

3. Досжанов Ерлан Оспанович – PhD, Тұрақты даму бойынша ЮНЕСКО кафедрасының қауымдастырылған профессоры, нанобиотехнология зертханасының меңгерушісі, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3454-8889>, e-mail: doszhanovyerlan@mail.ru

4. Керимкулова Алмагуль Рыскуловна – химия ғылымындарының кандидаты, Материалтану, нанотехнология және инженерлік физика кафедрасының қауымдастырылған профессоры, нанобиотехнология зертханасының жетекші ғылыми қызметкері, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8048-4970>, e-mail: almusha_84@mail.ru

5. Жумажанов Арман Нұрқанатұлы – Тұрақты даму бойынша ЮНЕСКО кафедрасының докторанты, нанобиотехнология зертханасының ғылыми қызметкері, ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0004-6256-9814>, e-mail: jumajanarman@gmail.com

6. Асанбек Назым Мұратқызы – химиялық физика материалтану кафедрасының докторанты, нанобиотехнология зертханасының ғылыми қызметкері, ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0000-4480-1756>, e-mail: naziko-asanbek@mail.ru

ЭКОЛОГИЯ ПОЧВ

IRSTI: 87.21.00; 87.21.09

DOI: 10.51886/1999-740X_2025_4_25

A.Yskak¹, G.N. Dauletkeldi^{1*}, K.A. Kazbekova¹, S.A. Daribayeva¹**THE STATE OF SOIL POLLUTION BY HEAVY METALS IN KOSTANAY REGION**

¹«Akhmet Baitursynuly Kostanay Regional University» NLC, 110000, Kostanay,
Abay ave., 28/1, Kazakhstan, *e-mail: gulnuradauletkel@gmail.com

Abstract. Kostanay Region of the Republic of Kazakhstan is one of the leading agricultural areas of the country, with vast expanses of arable land. However, the intensive development of the mining industry (e.g., ZHAGOK - Zhezkazgan Mining and Metallurgical Plant, TBRU - Torgai Bauxite Mining Administration), SSGPO - Sokolov-Sarbai Mining Production Association JSC in close proximity to cultivated fields has led to significant anthropogenic environmental pollution, particularly involving the accumulation of heavy metals in soils. This study presents monitoring data on the content of mobile forms of heavy metals (Pb, Cu, Cr, Zn, Cd) in the soils of five industrial-agricultural centers in the region (Kostanay, Zhetykara, Arkalyk, Lisakovsk, Rudny) from 2017 to 2024, obtained using atomic absorption spectrometry. The results reveal consistent exceedances of the maximum permissible concentrations (MPCs) for copper, chromium, and especially cadmium, including occasional sharp spikes likely linked to industrial emissions. Analysis of annual average concentrations indicates that cadmium and copper represent the greatest threat to agricultural systems due to their bioaccumulative potential and their capacity to disrupt biogeochemical processes in soils. This study underscores the urgent need for systematic environmental monitoring, adaptive agricultural management under industrial pressure, and the implementation of eco-technologies and remediation measures to ensure sustainable land use and food security.

Keywords: heavy metals, agroecology, soil pollution, remediation, Kostanay region.

INTRODUCTION

Kostanay Region is one of the main agricultural centers of Kazakhstan, with the largest tracts of agricultural land in the country, amounting to 18.0 million hectares [1]. According to the Bureau of National Statistics of the Agency for Strategic Planning and Reforms of the Republic of Kazakhstan, in 2023 the average crop yields were: cereals and legumes – 10.7 centners per hectare, potatoes – 194.1 c/ha, and oilseeds – 7.2 c/ha. At the same time, the region hosts several major mining enterprises. These include the Sokolov-Sarbai Mining and Processing Production Association (SSGPO) in Rudny – the largest producer of iron ore pellets and concentrate exported to China; Varvarinskoye in the village of Varvarinka – a mining and processing plant extracting gold and copper ores, with an annual capacity exceeding 4 million tons; and Kostanay Minerals in Zhitikara – one of the

global leaders in chrysotile-asbestos extraction and processing, ranked fourth in the world by total reserves [2].

During the extraction and processing of iron, copper, and asbestos ores, toxic elements such as lead, copper, cadmium, and zinc may enter the soil. In the absence of proper environmental control, these metals can transform into mobile forms and accumulate in agricultural crops, posing risks to food safety, public health, and the region's export resilience. In this context, the systematic monitoring of soils and agricultural raw materials in areas adjacent to industrial facilities is of particular relevance.

Pollution of agricultural soils by heavy metals is one of the most pressing global environmental challenges, directly impacting agricultural productivity, food safety, and human health. Numerous international and regional studies emphasize the critical role of metals such as

cadmium, lead, arsenic, mercury, and chromium, which enter the soil through atmospheric deposition, wastewater discharge, fertilizers, pesticides, and industrial activities. For example, a large-scale assessment by Haodong Zhao et al. evaluated contaminated areas in China using the Pollution Index (PI) and the Potential Ecological Risk Index (PERI), revealing significant concentrations of heavy metals – particularly cadmium, which was identified as the most hazardous element across most regions [3].

A similar study conducted in the Kostanay region of Kazakhstan (within the Sokolovsko-Sarbai Mining and Processing Plant area) recorded a high ecological risk index – up to 447 based on Hakanson's method – with pronounced exceedances of cadmium, arsenic, lead, and zinc. These findings underscore the urgent need for localized environmental monitoring and risk mitigation measures [4].

The need to improve land assessment is also emphasized in international documents. According to the EU Soil Strategy for 2030 (European Commission, 2021), soil monitoring should be based on regular collection of data on pollution, organic carbon, degradation, and anthropogenic risks using geospatial information and remote sensing. The recommendations of the FAO Global Soil Partnership (GSP) emphasize the importance of standardized sampling methods, assessment of heavy metal bioavailability, maintenance of geoinformation databases, and integration of national monitoring with global systems such as GSOCmap and SoilSTAT [5, 6].

In practice, despite the presence of contamination, it is possible to cultivate agricultural crops provided that agrochemical recommendations are followed. Babichev A.N. et al. indicate that technical crops can be grown on soils exceeding the maximum permissible concentrations (MPC), and that remediation methods and the use of neutralizing agents are also applicable [7]. In turn, Ivantsova E.A. and

Vodolazko A.N. emphasize the importance of adjusting land bonitation assessments, taking into account heavy metal pollution, especially in regions under industrial pressure [8].

The issue of pollutant bioavailability is addressed in the work by Decong Xu et al., which demonstrates that soil pH, organic matter content, and potassium levels significantly affect the uptake of metals by cereal crops. This is particularly true for cadmium, which is actively accumulated in rice and wheat [9]. A meta-analysis [10] confirms that in several regions, the concentrations of cadmium and lead in soils and agricultural products systematically exceed permissible limits, especially under long-term application of mineral fertilizers.

An additional contribution to understanding the sources of contamination is provided by a study conducted in the karst landscapes of China, where the use of the PMF (Positive Matrix Factorization) model revealed that 32% of soil pollution is attributed to geogenic factors, 31% to agricultural activities, and 19% to mining operations [11]. Similar assessments have been carried out in other regions – for example, in Chengdu (China), where APCS-MLR (Absolute Principal Component Scores – Multiple Linear Regression) modeling identified anthropogenic pressures as the main drivers of cadmium, lead, and zinc contamination in soils [12], as well as in the Liwa region (UAE), where localized exceedances of nickel, chromium, and lead were detected near infrastructural sites [13].

Special attention should be paid to the impact of heavy metals on microbiological and enzymatic processes in soils. For example, a study in Bangladesh demonstrates that the content of cadmium, lead, and chromium is negatively correlated with dehydrogenase and urease activity, indicating suppression of the soil microflora and a decline in fertility [14].

In the Russian context, anomalously high concentrations of copper, zinc, lead, and cadmium have been identified in the Yelizovsky district of Kamchatka, with both natural geochemical factors and anthropogenic activities (such as municipal waste burning, transportation, and industrial emissions) considered as sources of contamination [15].

Many authors [16, 17] provide a classification of pollution sources (atmospheric deposition, manure, fertilizers, pesticides), describe the mechanisms of metal uptake and accumulation in plants, and analyze modern remediation strategies. These include the selection of crop varieties with low metal accumulation, physiological blocking, water regime management, phytoremediation, and chemical soil amelioration. The authors also systematize contemporary approaches to reducing the bioavailability of metals and offer a classification of phytoremediation technologies based on contaminant type and plant tolerance. Particular attention is given to the synergy between various methods – for example, the combination of liming, organic fertilizers, and selective breeding has been shown to sustainably reduce cadmium and lead accumulation in plant biomass. In addition, the studies highlight the cumulative impact of pollutants on the central nervous system, immunity, and carcinogenesis, especially under chronic exposure. Pogorelov A.V. [18] also emphasizes the complexity of accounting for all influencing factors within agroecological zones.

Given the high agricultural importance of the region and the presence of major mining enterprises, the assessment of anthropogenic pressure on soils is particularly relevant. Considering the exceedances of heavy metal concentrations identified in previous studies and their ability to transform into bioavailable forms requiring environmental control, this study aims to assess the level and dynamics of soil contamination with heavy metals in

the Kostanay region and to determine the potential environmental risks for agricultural landscapes.

To achieve this aim, the following objectives were set:

1. to collect and perform laboratory analysis of soil samples for lead, copper, chromium, zinc, and cadmium;
2. to compare the obtained concentrations with current regulatory standards and identify areas of exceedance;
3. to analyse the spatial and temporal patterns of contamination for the period 2017–2024;
4. to identify probable anthropogenic sources of pollutants and conduct a preliminary environmental risk assessment.

MATERIALS AND METHODS

Soil sampling for the study of heavy metal content was carried out in accordance with GOST R 58595–2019 "Soils. Sampling" using a composite method, in which 5–10 individual samples were collected from each site at a depth of 0–20 cm and combined into one composite sample weighing at least 1 kg. Sampling was conducted in dry weather using clean spades or soil augers, with strict adherence to measures preventing cross-contamination. Each sample was labeled and documented with details of the location, date, depth, and sampling conditions. Samples were packed in sealed containers and transported to the laboratory no later than 24 hours after collection, with temperature conditions not exceeding +4 °C maintained when necessary.

The determination of mobile forms of heavy metals (lead, copper, chromium, zinc, and cadmium) in soil samples was carried out according to the procedure PND F 16.1:2:2.2:2.3.78–2013 (an officially approved Russian guideline for the determination of mobile forms of heavy metals in soils) using flame atomic absorption spectrometry (FAAS). Air-dried soil was sieved through a 1 mm mesh; a 1 g subsample was taken and extracted with

ammonium acetate buffer solution at pH 4.8. The resulting filtrate was analyzed on a spectrometer at the following characteristic wavelengths: Pb – 217.0 nm, Cu – 324.8 nm, Cr – 357.9 nm, Zn – 213.9 nm, Cd – 228.8 nm.

Each sample was analyzed in triplicate, followed by the calculation of the mean value and standard deviation. The detection limits were as follows: Pb - 0.5 mg/kg, Cu - 0.3 mg/kg, Cr - 0.4 mg/kg, Zn - 0.2 mg/kg, and Cd - 0.01 mg/kg; the relative error did not exceed 10%. Calibration was performed using five-point calibration curves ($R^2 \geq 0.999$). Quality control was ensured through the analysis of certified reference materials, blank samples, and periodic checks of signal stability. The applied method provides the required sensitivity for determining mobile metal fractions and assessing environmental impact.

The approach used in this study is consistent with international monitoring principles set out in the Guidelines for Soil Description FAO and in the analytical section of the EU Soil Strategy for 2030, which emphasizes the need for spatial referencing of samples, systematic sampling, and risk assessment for agroecosystems.

RESULTS AND DISCUSSION

As part of the study, soil samples were analyzed for the content of heavy metals – lead, copper, chromium, zinc, and cadmium – over the period from 2017 to 2024. The samples were collected in five settlements of the Kostanay region (table

1), each characterized by varying degrees of anthropogenic pressure and industrial activity:

Kostanay is the administrative center of the region, a city with developed infrastructure and moderate industrial activity. Sampling points were located in areas remote from major industrial facilities, allowing the obtained data to be used as a background reference.

Zhetykara is a city with a high level of industrial impact, primarily due to the operations of the Zhitikara Asbestos Mining and Processing Plant (ZHAGOK). Samples were taken in areas potentially affected by emissions and waste from the enterprise.

Arkalyk is a center for bauxite mining and processing, home to the Torgai Bauxite Mining Administration (TBRU). Sampling points included sites located near zones of ore storage, transportation, and processing, enabling the assessment of heavy metal contamination in soils.

Lisakovsk is a city with a developed mining industry, including facilities related to raw material processing. Sampling locations covered both residential and suburban areas potentially exposed to anthropogenic influences.

Rudny is a major industrial hub where the Sokolov-Sarbai Mining and Processing Production Association (SSGPO) is located. Samples were collected from areas exposed to mining and beneficiation activities, including zones near waste dumps and transport routes.

Table 1 – Soil sampling points of Kostanay region

№	Sampling location	Geographical coordinates	
		Latitude	Longitude
1	Kostanay	53.208065	63.633238
2	Zhetykara	52.179362	61.267467
3	Arkalyk	50.251804	66.925047
4	Lisakovsk	52.5449	62.494423
5	Rudny	52.977777	63.111987

Each sampling point was selected taking into account the spatial distribution of potential pollution sources and anthropogenic pressure, which made it possible to carry out a comparative analysis of soil contamination levels with heavy metals across different areas of the region.

Table 2 – Concentrations of heavy metals in the soils of Kostanay region

Heavy metal	Pb (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Cr (mg/kg)	Zn (mg/kg)	Cd (mg/kg)
MPC (mg/kg)	32,0	3,0	6,0	23,0	-
2017					
Kostanay	20,95	1,75	0,45	13,15	0,15
Zhetykara	26,80	0,98	0,40	14,70	0,30
Arkalyk	37,00	1,98	2,03	14,50	0,31
Lisakovsk	21,80	0,56	0,43	12,80	0,24
Rudny	28,35	0,83	0,43	17,15	8,83
2018					
Kostanay	24,40	2,55	0,39	14,30	0,18
Zhetykara	22,10	1,15	0,62	15,45	0,28
Arkalyk	46,75	2,50	1,03	22,00	0,30
Lisakovsk	15,16	1,86	0,88	13,10	0,21
Rudny	18,73	2,26	0,74	14,65	0,20
2019					
Kostanay	24,83	2,55	0,30	11,70	0,17
Zhetykara	27,87	1,35	0,57	12,65	7,61
Arkalyk	33,76	7,60	1,40	21,00	0,33
Lisakovsk	10,79	5,80	0,93	23,75	0,33
Rudny	15,07	15,10	0,86	13,80	0,25
2020					
Kostanay	24,83	2,55	0,30	11,70	0,17
Zhetykara	27,87	1,35	0,57	12,65	0,60
Arkalyk	33,76	7,60	1,40	21,05	0,33
Lisakovsk	10,79	5,80	0,93	23,75	0,33
Rudny	15,07	15,10	0,86	13,80	0,25
2021					
Kostanay	10,45	10,22	10,31	10,40	10,28
Zhetykara	9,38	9,11	9,25	9,30	9,14
Arkalyk	6,27	6,03	6,15	6,33	6,05
Lisakovsk	4,82	4,79	4,76	4,90	4,74
Rudny	7,15	7,44	7,05	7,21	7,10

Table 2 (continued)

2022					
Kostanay	31,66	2,66	0,72	12,79	0,15
Zhetykara	14,89	1,25	0,71	12,40	0,19
Arkalyk	14,79	2,05	1,15	13,95	0,26
Lisakovsk	11,59	1,58	0,82	10,75	0,18
Rudny	17,07	2,81	2,09	10,25	0,31
2023					
Kostanay	25,40	2,67	0,54	15,35	0,22
Zhetykara	21,36	1,18	1,83	10,86	0,47
Arkalyk	25,03	2,00	1,90	18,08	0,32
Lisakovsk	12,35	3,81	2,09	21,75	0,26
Rudny	17,49	2,00	1,23	12,65	0,27
2024					
Kostanay	18,90	3,26	0,61	13,75	0,18
Zhetykara	11,21	1,10	0,55	10,90	0,17
Arkalyk	16,55	2,35	1,45	17,10	0,29
Lisakovsk	11,20	1,75	0,68	12,05	0,20
Rudny	17,65	2,06	3,48	7,90	0,25

The analysis of heavy metal content in the soils of the Kostanay region for the period 2017–2024 revealed persistent exceedances of the maximum permissible concentrations (MPC) for lead in Arkalyk during 2017–2020, indicating a pronounced technogenic load in previous years. Exceedances of the MPC for copper were episodic and were observed mainly in Arkalyk, Lisakovsk, and Rudny in 2019–2020, while in Zhetikara copper concentrations remained within regulatory limits throughout the entire study period. Exceedances of the permissible zinc concentrations were recorded primarily in Lisakovsk, where Zn levels reached or surpassed threshold values in 2019–2020 (table 2).

Isolated anomalously high cadmium values were identified in Zhetikara and Rudny; however, chromium concentrations at all observation sites generally remained within regulatory limits. The most environmentally vulnerable areas in terms of

heavy metal contamination were Arkalyk, Rudny, and Lisakovsk, where the greatest amplitudes of variation and MPC exceedances were recorded [19–21].

Major industrial enterprises in the region are the likely sources of contamination, including the Zhetikara Asbestos Mining and Processing Plant (ZAGOK), the Torgai Bauxite Mining Administration (TBMA), and the Sokolov–Sarbai Mining and Processing Association (SSGPO). Their activities contribute to a significant anthropogenic load through dust emissions, ore transportation, waste rock disposal, and wastewater discharge. Considering the identified exceedances and spatial patterns of contamination, these territories are recommended for inclusion in the list of priority environmental control zones, with the establishment of regular soil monitoring and assessment of risks to human health and natural ecosystems.

Table 3 – Statistical indicators and environmental indices of heavy metal content in soils for 2017–2024 in the Kostanay region

Indicator	Pb	Cu	Cr	Zn	Cd
MPC (mg/kg)	32,0	3,0	6,0	23,0	-
2017	26,98	1,22	0,75	14,46	1,97
2018	25,03	2,06	0,73	15,10	0,23
2019	22,06	6,68	0,81	16,58	1,74
2020	22,06	6,68	0,81	16,60	0,34
2021	7,61	7,12	7,10	7,27	7,06
2022	17,80	2,07	1,10	12,83	0,22
2023	20,33	2,33	1,52	15,34	0,30
2024	15,10	2,30	1,35	12,34	0,22
Mean (mg/kg)	19,797	3,784	1,822	13,908	1,560
SD	9,185	3,564	2,379	4,486	2,952
95% CI low	16,951	2,679	1,085	12,518	0,645
95% CI high	22,644	4,888	2,560	15,298	2,475
PI	0.619	1.261	0.304	0.605	3.120
Ei (PERI)	3.093	6.306	0.607	0.605	93.600
Igeo	-0.600	-3.309	-5.849	-3.279	3.379

An analysis of the average annual concentrations of heavy metals in soils of the Kostanay region for 2017–2024 [22] shows that lead (Pb) concentrations in 2017–2020 ranged from 22 to 27 mg/kg, approaching the maximum permissible concentration (32 mg/kg). In 2021, a sharp decrease in Pb content to 7.61 mg/kg was observed; however, subsequent years demonstrated repeated fluctuations toward higher values, preventing the identification of a stable downward trend (table 3).

Copper (Cu) concentrations exceeded the MPC (3.0 mg/kg) only in 2019–2021, reaching the highest value in 2021 (7.12 mg/kg). In all other years, copper concentrations remained within regulatory limits, indicating that the anthropogenic influence was episodic rather than continuous.

Chromium (Cr) concentrations exceeded the regulatory threshold (6.0 mg/kg) only in 2021, reaching 7.10 mg/kg. In all other years, Cr levels remained well below the permissible level, suggesting a single episode of increased elemental input.

Zinc (Zn) concentrations remained within acceptable limits throughout the entire observation period, ranging from 7

to 17 mg/kg. Minor increases were recorded in 2019–2020 and 2023, but no exceedances of the MPC were detected.

Cadmium (Cd), despite the absence of an officially established MPC for soils, exhibited pronounced interannual variability. The highest values were recorded in 2017 (1.97 mg/kg), 2019 (1.74 mg/kg), and particularly in 2021 (7.06 mg/kg), indicating isolated periods of potentially hazardous inputs.

The greatest variability was observed for Pb (SD = 9.19 mg/kg) and Cd (SD = 2.95 mg/kg), which is associated with periodic anomalous emissions in specific areas, primarily Rudny and Zhetikara. Copper and chromium also demonstrated elevated standard deviation values (3.56 and 2.38 mg/kg, respectively), confirming significant interannual fluctuations. The most stable concentrations were observed for Zn (SD = 4.49 mg/kg).

According to the ecological indices, most metals (Pb, Cu, Cr, and Zn) remain at acceptable or background levels, not contributing to significant environmental pressure: PI and Igeo indicate the absence of contamination, while PERI values confirm low ecological risk. A slight

exceedance of the MPC was recorded only for copper (PI = 1.26), although its environmental risk remains low. In contrast, cadmium (Cd) is the primary contaminant: its PI = 3.12 indicates a pronounced exceedance of normative levels, PERI \approx 94 characterizes high ecological risk, and the positive Igeo value (3.38) reflects strong geochemical pollution. Thus, the overall environmental situation is assessed as satisfactory, but with a clear technogenic load from Cd, requiring targeted monitoring and control.

Particular attention should be given to the spatial distribution of contamination: elevated concentrations of Cd, Cu, and Pb were observed mainly in areas with high industrial activity—Rudny, Zhetikara, Arkalyk, and Lisakovsk—which correlates with the presence of large mining and processing enterprises, including SSGPO (Rudny), the Zhetikara Asbestos Mining and Processing Plant, Kostanay Minerals JSC (Zhetikara), the Arkalyk Bauxite Mine, the Varvarinskoye Mining and Processing Plant, as well as metallurgical and beneficiation facilities. The operations of these enterprises lead to dust emissions, tailings accumulation, ore transportation, and metal processing, which are likely sources of episodic heavy metal inputs into surrounding soils.

Overall, the dynamics of heavy metal concentrations in the region's soils reflect the presence of both short-term episodes of exceedances (Cu, Cr, Cd) and periodic approaches to the MPC for Pb. This highlights the need for systematic environmental monitoring, identification of specific emission sources, and regular assessment of soil conditions in the Kostanay region.

Based on the presented graph illustrating the dynamics of average concentrations of heavy metals (Pb, Cu, Cr, Zn, Cd) in soils for 2017–2024, the following conclusions can be drawn:

1. *Lead (Pb)*. In 2017–2020, Pb concentrations ranged from 22 to 27 mg/kg, approaching the MPC (32 mg/kg). In 2021, a sharp decrease to 7.61 mg/kg is observed, after which concentrations partially increase but remain well below the regulatory threshold. The dynamics indicate a reduction in anthropogenic load after 2020, despite continuing fluctuations (figure 1).

2. *Copper (Cu)*. Exceedances of the MPC (3 mg/kg) were recorded only in 2019–2021, when concentrations ranged from 6.68 to 7.12 mg/kg, with the maximum recorded in 2021. In all other years, Cu levels remained within acceptable limits, suggesting a short-term rather than a continuous anthropogenic influence.

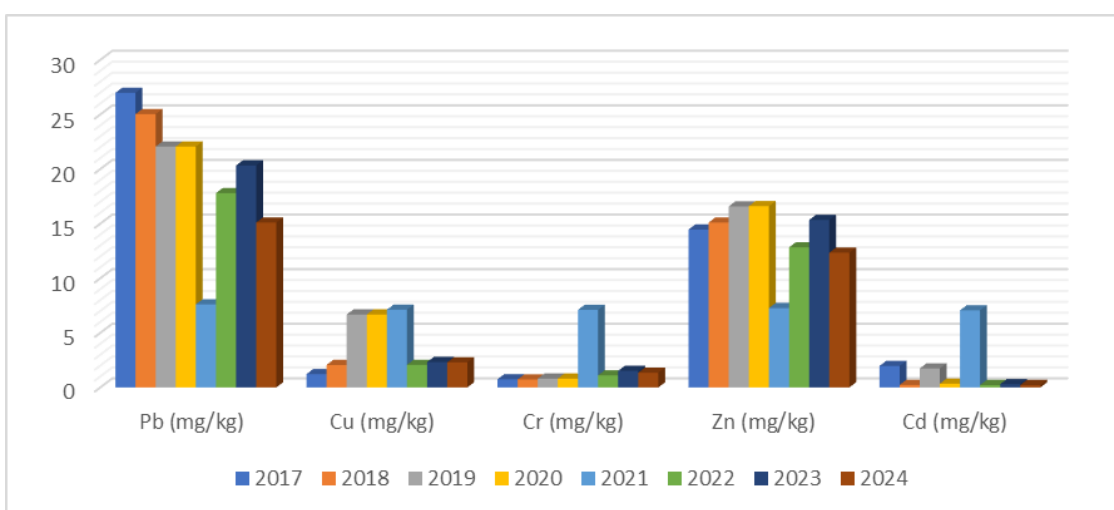


Figure 1 – Dynamics of heavy metal content in soils of the Kostanay region

3. *Chromium (Cr)*. The MPC (6 mg/kg) was exceeded only in 2021 (7.1 mg/kg). In all other years, Cr concentrations ranged from 0.73 to 1.52 mg/kg, far below the regulatory limit, indicating a single episode of elevated elemental input.

4. *Zinc (Zn)*. Zn concentrations remained within permissible levels throughout the entire observation period. Slightly elevated values were observed in 2019–2020 and 2023; however, no exceedances of the MPC were detected. Overall, Zn demonstrates stable behavior.

5. *Cadmium (Cd)*. The highest Cd concentrations were recorded in 2017 (1.97 mg/kg), 2019 (1.74 mg/kg), and especially in 2021 (7.06 mg/kg). In other years, concentrations remained low (0.22–0.34 mg/kg). Although no official MPC is established, the pronounced spike in 2021 may pose an environmental hazard due to the high toxicity of Cd.

The greatest environmental risks are associated with episodic exceedances of Cu, Cr, and Cd—particularly in 2021—as well as with periodic approaches of Pb concentrations to regulatory limits. Zn levels remain stable and environmentally safe. The obtained results highlight the need for regular monitoring and for identifying the sources of anthropogenic contamination.

In addition to anthropogenic sources, the natural properties of the region's soil cover play a significant role in shaping the spatial distribution of heavy metals. Wind erosion, which is characteristic of the steppe zone of the Kostanay region, facilitates the transport of dust particles from tailings storage facilities and industrial sites, leading to the secondary deposition of metals at considerable distances from emission sources.

The granulometric composition also determines the degree of migratory activity: light sandy and loamy-sandy soils have low sorption capacity and promote increased mobility of Cd, Pb, and Zn, whereas heavier loam and clay horizons ensure their retention. The acid-alkaline

regime is another important factor: the slightly alkaline soils (pH 7.5–8.2) predominant in the region reduce the mobility of Pb and Cr, while simultaneously increasing the solubility and bioavailability of Cd. High soil carbonate content contributes to the formation of poorly soluble compounds of Pb and Zn, limiting their vertical and horizontal migration. Thus, natural factors substantially modify the behavior of heavy metals in soils, which must be taken into account when interpreting observed trends and assessing environmental risks.

A map of the maximum concentrations of heavy metals (Pb, Cr, Zn, Cd) and copper (Cu) in the Kostanay Region is presented in figure 2.

These elements are classified as priority pollutants according to international land-quality assessments presented in the FAO Global Soil Pollution Assessment. Their high toxicity and tendency to accumulate in plants pose risks to food security and public health. The obtained results are consistent with the provisions of the EU Soil Strategy for 2030, which emphasizes the need for early detection of soil degradation, identification of pollution sources, and spatial modeling of risks for agroecosystems. To improve the regional soil-monitoring system, it is recommended to implement GIS technologies for developing digital maps of contamination and metal migration, apply remote sensing data (Sentinel-2, Landsat-8/9) to assess land degradation and technogenic disturbances, employ bioindicators (plants, microorganisms, lichen indices) for early detection of toxic impacts, expand the network of automated monitoring stations, and integrate national datasets into international platforms such as GSOCmap and SoilSTAT for comparison with global trends.

The identified patterns of heavy metal distribution in the soils of the Kostanay region indicate the presence of several environmental risks associated

with both continuous anthropogenic pressure and episodic emissions. Cadmium poses the greatest hazard, as pronounced interannual fluctuations and high values of environmental indices indicate a significant risk to ecosystems and human health. The risk of chronic lead exposure persists in industrial areas where its concentrations in previous years approached the MPC. Short-term spikes in copper and chromium levels reflect the likelihood of irregular technogenic impacts capable of disrupting the biogeochemical state of soils. Additional risks are associated with localized contamination in industrial centers, the

transport of dust particles from tailings storage facilities, and potential declines in soil fertility due to the toxic effects of metals. Taken together, these factors highlight the need for regular monitoring, control of anthropogenic sources, and assessment of potential impacts on the population and agricultural areas. Thus, the results of the study not only confirm the presence of significant environmental risks but also form the basis for developing a regional sustainable land-use program aligned with modern international approaches to soil protection.

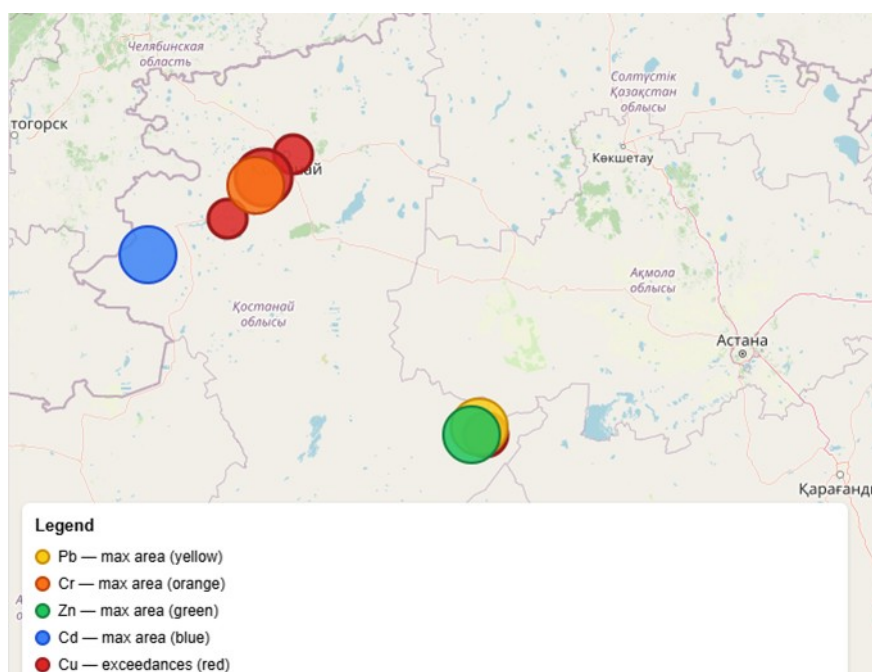


Figure 2 – Map of maximum heavy metal concentrations (Pb, Cr, Zn, Cd) and copper (Cu) exceedance zones in the Kostanay Region

CONCLUSION

The analysis of heavy metal concentrations in agricultural soils of the Kostanay region for the period 2017–2024 revealed that the region's agro-industrial potential is subject to significant environmental risks due to anthropogenic contamination. Persistent exceedances of copper, chromium, and especially cadmium levels recorded near major mining

enterprises pose a threat to the safety of agricultural products, disrupt the agrochemical balance of soils, and potentially reduce crop yields. Cadmium, even in low concentrations, can accumulate in cereals and oilseed crops, posing a hazard to the food chain. The results of this study confirm the urgent need for systematic agroecological monitoring and the implementation of environmental protection

practices in agriculture - such as liming, phytostabilization, and the application of organic fertilizers - to minimize the migration of toxicants into plants and ensure the sustainability of agroecosystems. Thus, this

work not only identifies the scale and sources of contamination but also provides a scientific basis for developing safe land-use strategies under industrial pressure.

FUNDING

Scientific research was carried out within the framework of grant program-targeted financing of research by scientists under the project for 2024-2026 on the topic BR24992839 "Study of the effects of ecotoxicants and innovative agricultural technologies on agricultural lands and products of Kostanay region".

REFERENCES

1. Ministrstvo sel'skogo khoziaistva Respubliki Kazakhstan. Svodnyi analiticheskiy otchet o sostoianii i ispol'zovanii zemel' Respubliki Kazakhstan za 2023 god. Astana: Ministrstvo sel'skogo khoziaistva RK, 2023. - 138 p.
2. Promyshlennost' Kostanaiskoi oblasti [Elektronnyi resurs]: Rezhim dostupa: <https://factories.kz/news/promyshlennost-kostanayskoy-oblasti>. Accessed July 3, 2025.
3. Zhao H., Wu Y., Lan X., Yang Y., Wu X., Du L. Comprehensive assessment of harmful heavy metals in contaminated soil in order to score pollution level// Scientific Reports. - 2022. - Vol. 12. - № 7602. - P. 1-13.
4. Zhyrgalova A., Yelemessova S., Ablakhana B., Aitkhozhayeva G., Zhildikbayeva A. Assessment of potential ecological risk of heavy metal contamination of agricultural soils in Kazakhstan// Brazilian Journal of Biology. - 2023. - Vol. 83. - Article ID: e280583. - P. 1-9.
5. European Commission. EU Soil Strategy for 2030: Reaping the benefits of healthy soils for people, food, nature and climate. Brussels: European Commission, 2021. 30 p. Available at: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52021DC-0699>. Accessed November 21, 2025.
6. FAO. Global Assessment of Soil Pollution. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2018. 260 p. Available at: <https://www.fao.org/documents/card/en/c/19183EN/>. Accessed November 21, 2025.
7. Bekenov D.Zh., Abishev N.K. Issledovanie sodержanie tiazhelykh metallov v pochvakh sel'skokhoziaistvennykh ugodij Severnogo Kazahstana// Kazahstanskaia nauka, - 2022. - Vol. 4(4). - P. 12-26.
8. Ivancova E.A., Vodolazko A.N. Vliianie zagriazneniia pochv sel'skokhoziaistvennykh zemel' tiazhelymi metallami na ikh bonitirovochnuiu ocenku (na primere Volgogradskoy oblasti)// Vestnik ekologicheskoi bezopasnosti. - 2019. - 4. - P. 111-115.
9. Xu D., Shen Zh., Dou Ch., et al. Effects of soil properties on heavy metal bioavailability and accumulation in crop grains under different farmland use patterns// Scientific Reports. - 2022. - Vol. 12. - № 13140. - P. 1-15.
10. Che Nde S., Mba Felicite O., Sanjo Aruwajoye G., Gertrude Palamuleni L. A meta-analysis and experimental survey of heavy metals pollution in agricultural soils// Journal of Trace Elements in Medicine and Biology. - 2024. - Vol. 79. - № 100180. - P. 1-13.
11. Qin Yu., Zhang F., Xue Sh., Ma T., Yu L. Heavy Metal Pollution and Source Contributions in Agricultural Soils Developed from Karst Landform in the Southwestern Region of China// Toxics. - 2022. - Vol. 10 (10). - P. 1-18.
12. Peng Y., Grigorieva I. Assessment of heavy metal pollution on agricultural land in Chengdu city under different anthropogenic pressures based on APCS-MLR modeling// Ecological Indicators. - 2024. - Vol. 158. - № 112183. - P. 1-11.

13. Rafiq M., Ali S., Abbas S. et al. Risk assessment of heavy metals in soil and vegetables from suburban area// *Toxics*. – 2021. -Vol. 9(3). - № 53. - P. 1-13.
14. Ahmetova L.K., Sarsembaev Zh.T. Otsenka zagriazneniia pochv tiazhelymi metallami v agrolandshaftakh Severnogo Kazakhstana// *Pochvovedenie i agrojekologiya*. – 2023. – 2. - P. 54–63.
15. Ermakova S.V. Soderzhanie tiazhelykh metallov pochv sel'skokhoziaistvennykh ugodii iugo-vostochnoi Kamchatki// *Tezisy XIII Nacional'noi nauchno-prakticheskoy konferencii*, 2022. - P. 87–91.
16. Wan Y., Liu J., Zhuang Zh., Wang Q. Li H. Heavy Metals in Agricultural Soils: Sources, Influencing Factors, and Remediation Strategies// *Toxics*. – 2024. - Vol. 12(1), № 63. - P. 1-17.
17. Alengebawy A., Taha Abdelkhalek S., Rana Qureshi S., Wang M. Heavy Metals and Pesticides Toxicity in Agricultural Soil and Plants: Ecological Risks and Human Health Implications// *Toxics*. – 2021. - Vol. 9(3), № 42. - P. 1-33.
18. Musaev E.S., Muhamedzhanova G.S. Kharakteristika pochv po sodержaniyu tiazhelykh metallov v raionakh Aktyubinskoi oblasti// *Geografiia i prirodnye resursy Kazahstana*. – 2021. – Vol. 4(53). – P. 54–61.
19. Kazhydromet. Informatsionnyi biulleten' o sostoianii okruzhaiushchei sredy Respubliki Kazakhstan za 2017–2018 gg. Astana: Kazhydromet, 2019. - 128 p.
20. Kazhydromet. Informatsionnyi biulleten' o sostoianii okruzhaiushchei sredy Respubliki Kazakhstan za 2019–2020 gg. Nur-Sultan: Kazhydromet, 2021. - 134 p.
21. Kazhydromet. 2025. Informatsionnyi biulleten' o sostoianii okruzhaiushchei sredy Kostanaiskoi oblasti za 2021–2024 gg. Kostanay: Kazhydromet, 2025. - 156 p.
22. Federal'nyi tsentr gigeny i epidemiologii Rospotrebnadzora. GN 2.1.7.2041–06. Pochva, ochistka naseleennykh mest, sanitarnaya okhrana pochvy. Predel'no dopustimye kontsentratsii (PDK) khimicheskikh veshchestv Moscow: Federal'nyi tsentr gigeny i epidemiologii Rospotrebnadzora, 2006. - 15 p.

ТҮЙІН

А. Ысқақ¹, Г.Н. Дәулеткелді^{1*}, К.А. Казбекова¹, С.А. Дарибаева¹
ҚОСТАНАЙ ОБЛЫСЫНДАҒЫ ТОПЫРАҚТЫҢ АУЫР МЕТАЛДАРМЕН ЛАСТАНУ
ЖАҒДАЙЫ

¹«Ахмет Байтұрсынұлы атындағы Қостанай өңірлік университеті» КЕАҚ,
110000, Қостанай, Абай даңғылы, 28/1, Қазақстан,
*e-mail: gulnuradauletkel@gmail.com

Қазақстан Республикасының Қостанай облысы - егістік алқаптары кең, еліміздің жетекші ауылшаруашылық аймақтарының бірі. Алайда тау-кен өнеркәсібінің (мысалы, ЖАГОК - Жезқазған тау-кен металлургия комбинаты, ТБРУ - Торғай боксит кен басқармасы, ССКӨБ - Соколов-Сарыбай тау-кен өндірістік бірлестігі АҚ) егістік жерлерге жақын орналасуы қоршаған ортаның елеулі антропогендік ластануына, әсіресе топырақта ауыр металдардың жиналуына алып келуде. Бұл зерттеуде облыстың бес өнеркәсіптік-ауылшаруашылық орталығында (Қостанай, Жетіқара, Арқалық, Лисаковск, Рудный) 2017–2024 жылдар аралығында топырақтағы ауыр металдардың (Pb, Cu, Cr, Zn, Cd) жылжымалы формаларының құрамы атомдық-абсорбциялық спектрометрия әдісімен анықталды. Алынған нәтижелер мыс, хром және әсіресе кадмий бойынша шекті рұқсат етілген концентрациялардың (ШРК) тұрақты түрде асып кеткенін көрсетті. Сондай-ақ, өнеркәсіптік шығарындылармен байланысты болуы мүмкін күрт секірулер де тіркелді. Орташа жылдық концентрацияларды талдау кадмий мен мыстың биоаккумулятивтік әлеуеті мен топырақтағы биогеохимиялық процестерді бұзу қабілетіне байланысты

ауылшаруашылық жүйелеріне ең үлкен қауіп төндіретінін көрсетеді. Зерттеу нәтижелері жүйелі экологиялық мониторингтің, өнеркәсіптік қысым жағдайында ауыл шаруашылығын бейімдеп басқарудың, сондай-ақ жер ресурстарын тұрақты пайдалануды және азық-түлік қауіпсіздігін қамтамасыз ету үшін экологиялық технологиялар мен рекультивациялық шараларды енгізудің маңыздылығын көрсетеді.

Түйінді сөздер: ауыр металдар, агроэкология, топырақтың ластануы, ремедиация, Қостанай облысы.

РЕЗЮМЕ

А. Ысқақ¹, Г.Н. Дәулеткелді^{1*}, К.А. Казбекова¹, С.А. Дарибаева¹
СОСТОЯНИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОЧВ ТЯЖЁЛЫМИ МЕТАЛЛАМИ
В КОСТАНАЙСКОЙ ОБЛАСТИ

¹НАО «Костанайский региональный университет имени Ахмет
Байтұрсынұлы», 110000, Костанай, пр. Абая, 28/1, Казахстан,

*e-mail: gulnuradauletkel@gmail.com

Костанайская область Республики Казахстан представляет собой один из ведущих аграрных регионов страны, обладающий значительными площадями сельскохозяйственных угодий. Однако интенсивное развитие горнодобывающей промышленности (ЖАГОК, ТБРУ, ССГПО и др.) вблизи посевных территорий сопровождается техногенным загрязнением окружающей среды, включая поступление тяжёлых металлов в почвы. В настоящем исследовании проведён мониторинг содержания подвижных форм тяжёлых металлов (Pb, Cu, Cr, Zn, Cd) в почвах пяти промышленных и аграрных центров региона (Костанай, Жетыкара, Аркалык, Лисаковск, Рудный) за 2017–2024 гг. по методике атомно-адсорбционной спектроскопии. Полученные данные выявили устойчивые превышения предельно допустимых концентраций по меди, хрому и особенно кадмию, с эпизодами резких скачков, вероятно, обусловленных промышленными выбросами. Анализ среднегодовых концентраций показал, что именно кадмий и медь представляют наибольшую потенциальную опасность для агросистем, ввиду их способности накапливаться в сельхозпродукции и нарушать биогеохимические процессы в почвах. Работа подчёркивает необходимость системного экологического контроля и адаптивного управления сельским хозяйством в условиях промышленной нагрузки, а также использования природоохранных технологий и стратегий ремедиации для обеспечения устойчивого землепользования и продовольственной безопасности.

Ключевые слова: тяжёлые металлы, агроэкология, почвенное загрязнение, ремедиация, Костанайская область.

INFORMATION ABOUT ALL AUTHORS

1. Yskak Aliya – Scientific Research Institute of Applied Biotechnology, Director of the Scientific Research Institute of Applied Biotechnology, Candidate of Agricultural Sciences, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-8313-8982>, e-mail: alia-almaz@mail.ru

2. Dauletkeldi Gulnur Nurlankyzy – Department of Natural Sciences, Master's student «7M01503 Chemistry» educational program, ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0002-5996-8545>, e-mail: gulnuradauletkel@gmail.com

3. Kazbekova Karina Azamatovna – Scientific Research Institute of Applied Biotechnology, Master of Pedagogical Sciences in EP «7M01503 Chemistry», ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6468-2843>, e-mail: karina09081999@gmail.com

4. Daribayeva Sevara Anvarkyzy – Department of Natural Sciences, Master of Natural Sciences, Senior lecturer at the Department of Natural Sciences, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1911-6663>, e-mail: sevara.daribaeva@gmail.com

АГРОХИМИЯ

МРНТИ 68.33.29

DOI: 10.51886/1999-740X_2025_4_38

С.Б. Кененбаев^{1*}, В.Н. Гусев^{1*}, А.М. Сагимбаева¹, К.У. Рустемова¹
ДИСТАНЦИОННАЯ ДИАГНОСТИКА ОБЕСПЕЧЕННОСТИ ПОЧВ ЭЛЕМЕНТАМИ
ПИТАНИЯ И УРОЖАЙНОСТИ ОЗИМОЙ ПШЕНИЦЫ НА ОРОШАЕМЫХ
СВЕТЛО-КАШТАНОВЫХ ПОЧВАХ

¹ТОО «Казахский научно-исследовательский институт земледелия и растениеводства», 040909, Алматинская область, Карасайский район,

Алмалыбак, ул.Ерлепесова, 1, Казахстан,

**e-mail: serikkenenbayev@mail.ru; agfaagro@mail.ru*

Аннотация. В статье представлена оценка роли дистанционного зондирования земли в системе точного земледелия. Выявлено, что первостепенное значение имеет растительная и почвенная диагностики азотного и фосфорного питания растений для дифференцированного применения удобрений. Определены спектральные индексы, которые находятся в прямой зависимости от уровня азотного питания озимой пшеницы. Увеличение нормы вносимого минерального азота с 60 до 180 кг/га повысили показатели NDVI с 0,64 до 0,72. Последствие 20-60 т/га навоза изменяло эти показатели в более узких пределах – с 0,62 до 0,67. Калийные туки практически не изменяли показатели NDVI с некоторой тенденцией к снижению при увеличении их норм внесения. Рассчитана взаимосвязь между содержанием азота и хлорофиллом в растениях и урожайностью зерна, на основании, которой были получены индексы обеспеченности азотом и «зелёности» для различных уровней урожайности зерна. Установлено, что использование показателей индексов NDVI с помощью портативных фотометров не уступает традиционным методам диагностики азотного питания и может эффективно применяться в системе точного земледелия для установления количественной оценки степени интенсивности внутривидовой неоднородности и нуждаемости посевов озимой пшеницы в азотном питании.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, минеральное питание, озимая пшеница, урожайность, NDVI.

ВВЕДЕНИЕ

Мониторинг земель сельскохозяйственного назначения является важной задачей, поскольку позволяет оценить их состояние. Одной из проблем, требующих внимания, является чрезмерная распашка и длительная обработка почвы в сельскохозяйственном производстве без восстановления плодородия, что приводит к деградации почвенного покрова. Это может проявиться в снижении содержания органического вещества, разрушении структуры почвы и утрате плодородия. Деградация земель ведет к снижению урожайности и качества посевов, что негативно сказывается на экономической эффективности сельского хозяйства [1, 2].

Особенно важно обратить внимание на деградацию почв в зоне с недостаточным количеством осадков на юго-востоке Казахстана, отличающихся низким уровнем естественного плодородия. Прежде всего, это (сравнительно с другими типами) бедность почвы органическим веществом, и как следствие, запасами минерального азота, который находится в первом минимуме. Другим важнейшим составляющим почвенного плодородия является фосфор, который играет особую роль в жизнедеятельности растений, выполняя функции регулятора энергетического баланса [3].

Появившиеся в XX веке технические возможности, в частности компьютерная технология, информационная и

телекоммуникационная техника открыли новый этап в развитии технологических решений для реализации на практике высокоэффективных агротехнологий в системе точного земледелия. Точное земледелие включает три главных компонента:

а) оценка состояния почвы и растительного покрова каждого конкретного участка поля на основе интеграции данных дистанционного зондирования земли (ДЗЗ) с полевыми и лабораторными исследованиями;

б) использование глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), обеспечивающих точность технологических операций (посев, обработка, уборка) с учетом особенности рельефа и т.д.;

в) корректировка норм высева, доз внесения удобрений и средств защиты растений в зависимости от обеспеченности почв питательными веществами, состояния растений, наличия сорняков, болезней и вредителей на каждом конкретном участке обрабатываемого поля в режиме реального времени.

Данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) уже сейчас находят все более широкое применение в сельском хозяйстве, особенно для принятия управленческих решений. К числу наиболее динамично развивающихся и приоритетных сфер применения данных ДЗЗ относятся космический сельскохозяйственный мониторинг, управление сельскохозяйственным землепользованием, создание и актуализация карт сельскохозяйственных земель, в т.ч. мониторинг изменения границ посевных площадей, состояния посевов на основе расчета вегетационных индексов, оценка продуктивности сельскохозяйственных культур и прогноз их урожайности, картографирование характеристик почвенного покрова земель, уточнение и обновление существующих почвенных и агрономических карт на

основе материалов аэрофотосъемки с использованием БПЛА, выявление и картографирование участков деградации и другое [4-11].

Новизной исследований является использование данных дистанционного зондирования в точном земледелии для обнаружения аномального развития (угнетенного состояния) растений. Такие аномалии могут быть вызваны самыми различными факторами: поражением растений вредителями, угнетением их сорной растительностью, недостатком основных элементов питания, водным стрессом растений и т.д. [12-18].

Более сложной задачей является обнаружение количественных связей между биофизическими параметрами состояния растений и изменениями спектрального отклика растительного покрова, обусловленного влиянием конкретного фактора внешней среды или применяемой агротехнологии. В этой связи задачей настоящей работы является диагностика (как растительная, так и почвенная) азотного и фосфорного питания для эффективного внедрения в системе точного земледелия.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объектом исследований является длительный многофакторный стационарный полевой опыт на орошаемых светло-каштановых почвах Казахского научно-исследовательского института земледелия и растениеводства.

Район исследований относится к предгорной пустынно-степной зоне с абсолютными отметками 800-900 метров над уровнем моря. Почва опытного участка светло-каштановая, среднесуглинистая. Содержание гумуса 2,0-2,5%. Почва очень низко обеспечена щелочно-гидролизуемым азотом, среднеобеспечена подвижным фосфором и обменным калием.

Исследования проводились в 2018-2024 гг. с целью повышения продуктив-

ности озимой пшеницы на основе дифференцированного применения удобрений, основанных на учете внутривидовой вариации полей и растений по содержанию элементов питания для сельскохозяйственного производства юго-востока Казахстана.

Схема опыта представляет специальную выборку 1/8 части полного факториального эксперимента (4x4x4x4), включающего 32 варианта в двукратной повторности (рисунок 1). В опыте изучалась эффективность возрастающих норм азотных, фосфорных, калийных удобрений и навоза на агрохимические показатели почвы, урожайность и качество зерна озимой

пшеницы. Одинарная норма минеральных удобрений составляла N60P60K60, навоза – 20 т/га. Навоз вносился один раз за ротацию севооборота под кукурузу на зерно.

Мониторинг и наблюдение опытного участка в период роста и развития сорта озимой пшеницы Алмалы проводились с помощью БПЛА методом дистанционного зондирования, который выполнялся в спектральном индексе NDVI. Основным показателем NDVI при его дистанционном определении служит зеленая фитомасса сельскохозяйственных культур, которая определяется содержанием хлорофилла.

8 0202	7 3113	6 1333	5 2022	4 2220	3 1131	2 3311	1 0000
16 2002	15 1313	14 3133	13 0222	12 0020	11 3331	10 1111	9 2200
24 1133	23 2222	22 0002	21 3313	20 3111	19 0200	18 2020	17 1331
32 3333	31 0022	30 2202	29 1113	28 1311	27 2000	26 0220	25 3131
40 2220	39 1131	38 3311	37 0000	36 0202	35 3113	34 1333	33 2022
48 0020	47 3331	46 1111	45 2200	44 2002	43 1313	42 3133	41 0222
56 3111	55 0200	54 2020	53 1331	52 1133	51 2222	50 0002	49 3313
64 1311	63 2000	62 0220	61 3131	60 3333	59 0022	58 2202	57 1113

Рисунок 1 - Схема расположения вариантов опыта

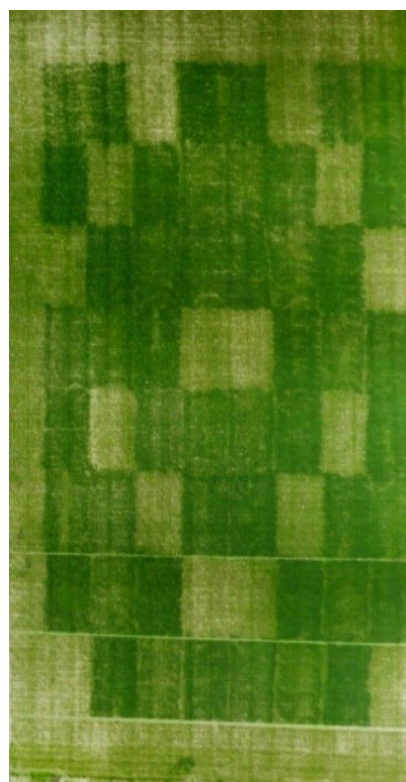


Рисунок 2 - Снимок опытного участка с помощью БПЛА

Площадь опытной делянки – 150 м² (25x6 м), повторность опыта 4-х кратная. Определение основных элементов питания (НРК) в почве и растениях про-

водили по соответствующим ГОСТам и общепринятым методикам. Щелочно-гидролизующий азот в почве определяли по Корнфилду, подвижный фосфор и

обменный калий по Мачигину, в модификации ЦИНАО (ГОСТ 26205-91). Статистическая обработка данных проводилась по Б.А. Доспехову [19].

Спектральная отражательная способность зеленой растительности является характерным признаком и используется для дистанционной диагностики обеспеченности растений элементами питания. В видимом диапазоне волн пигментация влияет на спектральные характеристики растений, особенно хлорофилла, что отчетливо видно на рисунке 2. По представленному снимку опытного участка прослеживается пестрота опытного поля, особенно выделяются деланки без внесения азотных удобрений и варианты с различными их нормами.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Важнейшим условием формирования высоких урожаев хорошего качества является обеспечение растений достаточным количеством питательных веществ в течении вегетации. Начиная с прорастания семени и появления первичного корешка, растения озимой

пшеницы нуждаются в фосфоре, а с появлением первых листочков и в азоте. Достаточное фосфорное и азотное питание в начальный период стимулирует рост и развитие растений, способствует большему усвоению питательных веществ.

На первом этапе исследований нами установлена взаимосвязь между возрастающими нормами удобрений (60-120-180 кг/га действующего вещества) и содержанием азота, фосфора, калия и хлорофилла (таблица 1).

При основном внесении возрастающих норм удобрений содержание элементов питания в растениях озимой пшеницы повышалось. Так в фазу кущения содержание азота увеличилось на 0,68-1,18%, фосфора - на 0,24-0,49, калия - на 0,96-1,18%. При этом наибольшие показатели прироста при увеличении доз удобрений (в относительных процентах) характеризовали содержание фосфора 77,8%, прирост содержания азота и калия составил 30 и 34%, соответственно.

Таблица 1 – Влияние удобрений на содержание азота, фосфора, калия и хлорофилла в растениях пшеницы в начальные фазы развития

Кодированные нормы удобрений*	Содержание, %						
	до подкормки азотом			после подкормки азотом			
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	хлорофилл, мг/г сырой массы
0000	3,03	0,59	3,46	3,12	0,82	3,59	4,0
1111	3,71	0,83	4,42	3,61	1,06	4,55	6,93
2222	3,95	1,08	4,62	5,80	1,20	4,76	7,31
3333	4,08	1,05	4,64	6,47	1,17	4,80	7,93

Примечание: первая цифра азот, вторая – фосфор, третья – калий, четвертая – навоз

Азотная подкормка озимой пшеницы в максимальной дозе - 120 кг/га в период кущения привела к наибольшему увеличению содержания азота к концу полного кущения на 107,1 и хлорофилла на 94,4 относительных %. Содержание фосфора и калия возросло

на 42,7 и 33,7%. При этом содержание азота на 92% и содержания хлорофилла на 81% определялись нормами внесения азотного удобрения в подкормку. Что подтверждают данные рисунка 3, показывающих силу и направленность действия отдельных элементов и их

взаимодействия на содержание общего азота в растениях озимой пшеницы.

Анализ полученных урожайных данных позволил рассчитать уравнение регрессии, в котором с высокой степенью вероятности ($r=0.89$; $d=79.2$) описывается действие удобрений на урожайность зерна пшеницы.

Из рисунка 4 видно, что определяющее влияние на урожайность зерна оказывают азотные удобрения. Практически отсутствовала эффективность фосфорных удобрений, что объясняется достаточно высокой обеспеченностью опытного участка подвижным фосфором (40,8 мг/кг).

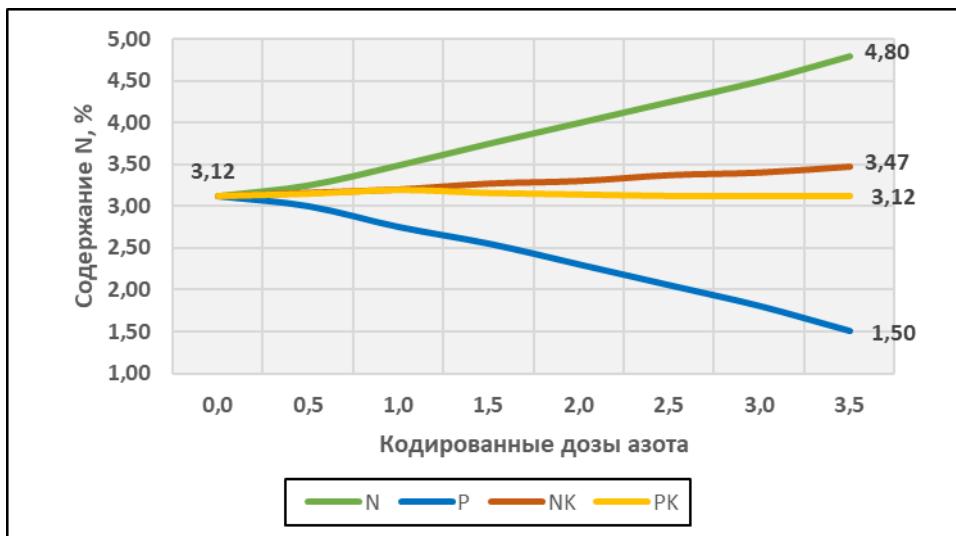


Рисунок 3 – Влияние удобрений на содержание общего азота в растениях озимой пшеницы в фазу кущения

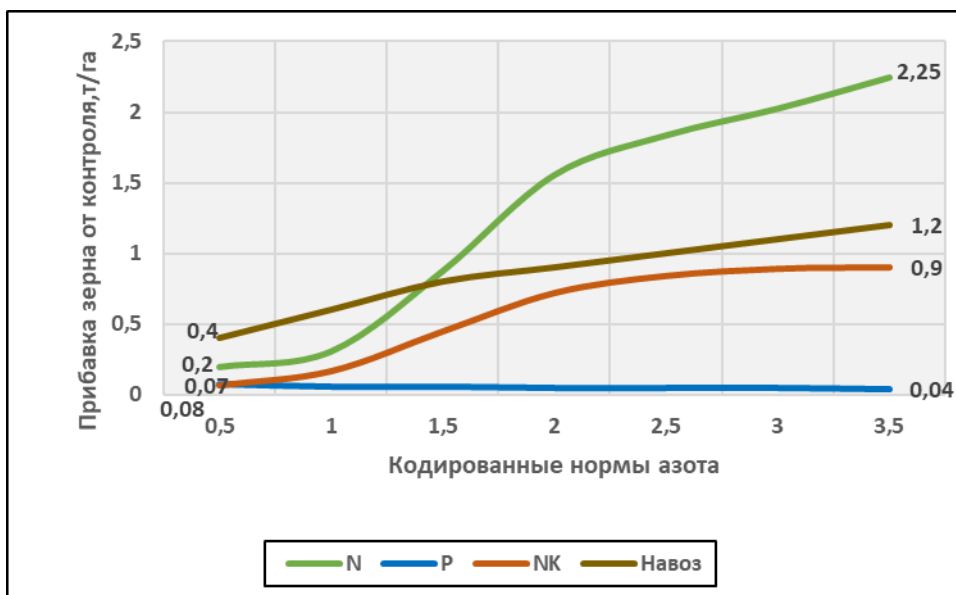


Рисунок 4 - Влияние удобрений на прирост урожая зерна озимой пшеницы

Была рассчитана взаимосвязь между содержанием азота и хлорофилла в растениях и урожайностью зерна, на основании которой были получены индексы обеспеченности азотом и индексы «зелёности» (таблица 2).

Таблица 2 - Индексы обеспеченности растений озимой пшеницы азотом и индексы «зелености» для различных уровней урожайности зерна

Урожайность зерна, т/га	< 3,0	3,1-3,5	3,6-4,0	4,1-4,5	4,6-5,0	>5,0
Общий азот, %	< 2,6	2,7-3,0	3,1-3,3	3,4-3,7	3,8-4,0	>4,0
Хлорофилл, мг/г	< 1,8	1,9-2,3	2,4-2,7	2,8-3,1	3,2-3,5	>3,5

О принципиальной возможности прогнозировать урожай зерна пшеницы по содержанию общего азота или хлорофилла в фазу кущения (ответственная фаза закладки и формирования урожая) свидетельствуют данные рисунков 5 и 6, где были сопоставлены фактические урожаи зерна в многофакторном опыте (64 варианта) и их расчетные показатели по содержанию азота ($r=0.75$) и хлорофилла ($r=0.73$) в биомассе растений.

Нами устанавливалась возможность дистанционной диагностики обеспеченности растений озимой пшеницы элементами минерального питания при помощи фотометрического определения вегетационного индекса – NDVI.

В литературе имеется достаточное количество исследований, свидетельствующих об успешном опыте применения этого метода для установления нуждаемости зерновых культур, в частности, азоте [20-22].

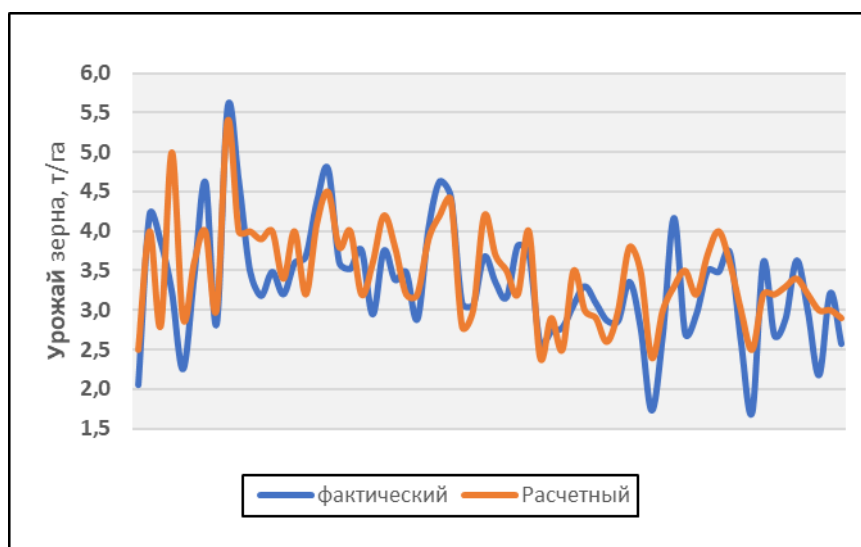


Рисунок 5 – Фактический и расчетный (по содержанию общего N) урожай зерна пшеницы

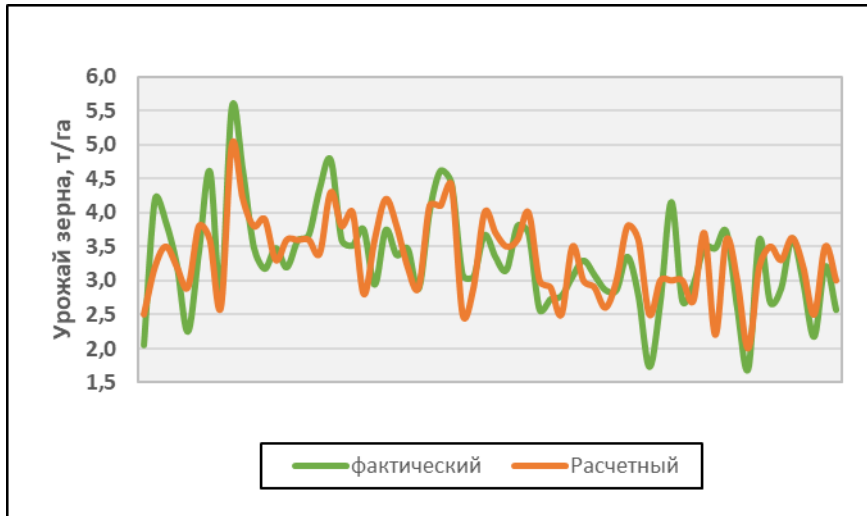


Рисунок 6 – Фактический и расчетный (по содержанию хлорофилла) урожай зерна пшеницы

Для проведения фотометрической диагностики был использован портативный датчик Green Seeker, который позволяет определять индекс NDVI посредством отраженного света от листовой поверхности растений и излучения света по двум длинам волн (рисунок 7).

Полученные спектральные индексы находились в прямой зависимости от уровня азотного питания озимой пше-

ницы. Увеличение нормы вносимого минерального азота с 60 до 180 кг/га увеличивали показатели NDVI с 0.64 до 0.72. Последствием 20-60 т/га навоза изменяло эти показатели в более узких пределах – с 0,62 до 0,67. Калийные туки практически не изменяли показатели NDVI с некоторой тенденцией к снижению при увеличении их норм внесения (таблица 3).

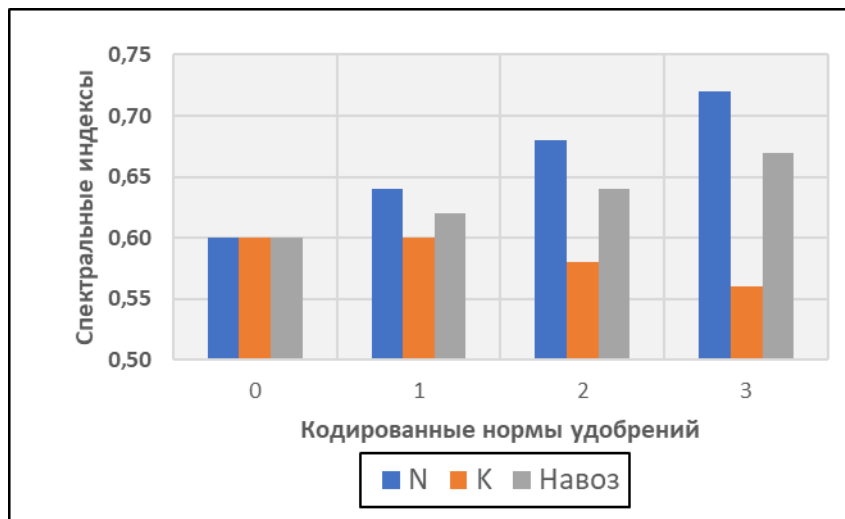


Рисунок 7 – Нормы удобрений и спектральные индексы озимой пшеницы в фазу трубкования

Таблица 3 - Обеспеченность озимой пшеницы азотным питанием, определенная дистанционным и наземными методами в фазы кущения растений

Варианты опыта	NDVI*	Содержание N	Содержание хлорофилла	Урожай, т/га
0	0,60	3,12	4,08	3,2
N60	0,64	3,61	6,93	3,5
N120	0,68	5,80	7,31	4,8
N180	0,72	6,47	7,93	5,5
Коэффициент корреляции (r)	0,98	0,99	0,64	
<i>Примечание: *- NDVI в фазу выметывания</i>				

Приведенные диагностические показатели, полученные способом дистанционного зондирования и традиционными методами и их тесная взаимосвязь между собой и полученным урожаем, выражаемая высокими значениями коэффициентов парной линейной корреляции, свидетельствует о возможности установления обеспеченности растений озимой пшеницы азотным питанием на основе данных NDVI.

ВЫВОДЫ

1. В результате исследований определены спектральные индексы, которые находятся в прямой зависимости от уровня азотного питания озимой пшеницы. Увеличение нормы вносимого минерального азота с 60 до 180 кг/га увеличивали показатели NDVI с 0.64 до 0.72. Последствие 20-60 т/га навоза изменяло эти показатели в более узких пределах – с 0,62 до 0,67. Калийные туки практически не изме-

няли показатели NDVI с некоторой тенденцией к снижению при увеличении их норм внесения.

2. Рассчитана взаимосвязь между содержанием азота и хлорофилла в растениях и урожайностью зерна на основании которой были получены индексы обеспеченности азотом и «зелёности» для различных уровней урожайности зерна.

3. Установлено, что использование показателей индексов NDVI не уступает традиционным методам диагностики азотного питания (содержание азота и хлорофилла в биомассе растений) и может эффективно применяться в системе точного земледелия для установления количественной оценки степени интенсивности внутривидовой неоднородности и нуждаемости посевов озимой пшеницы в азотном питании для получения планируемых уровней урожайности.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Данная статья опубликована в рамках программно-целевого финансирования научных исследований Министерства сельского хозяйства Республики Казахстан на 2024-2026 годы по программе ИРН BR22885719 «Разработать и внедрить устойчивые системы земледелия для рентабельного производства сельскохозяйственной продукции в условиях изменяющегося климата для различных почвенно-климатических зон Казахстана».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Берденгалиева А.Н., Берденгалиев Р.Н. Связь сезонной динамики озимой пшеницы и рельефа в подзоне южных чернозёмов Волгоградской области// Научно-агрономический журнал. – 2022. – № 3(118). – С. 49–56.

2. Манаенков А.С., Корнеева Е.А. Биogeографические аспекты оценки эффективности защиты пахотных земель лесными полосами// Вестник Московского университета. Серия 5: География. – 2021. – № 3. – С. 48–54.
3. FAO. The Future of Food and Agriculture – Trends and Challenges. – Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2017. – 163 p.
4. Hendricks G.S., Shukla S., Roka F.M. et al. Economic and environmental consequences of overfertilization under extreme weather conditions// Journal of Soil and Water Conservation. – 2019. – Vol. 74. – P. 160–171.
5. Холодов О.А. Комплексный мониторинг использования земель сельскохозяйственного назначения в современный период// Вестник Волгоградского государственного университета. Серия «Экономика». – Волгоград, 2019. – № 3. – С. 107–119.
6. Богданова О.В., Окмянская В.М., Сизов А.П. Анализ системы мониторинга объектов особо охраняемых природных территорий на примере Тюменской области// Использование и охрана природных ресурсов в России. – Тюмень, 2019. – № 3(159). – С. 72–77.
7. Мартынова Н.Г., Кравченко В.Г. Мониторинг сельскохозяйственных земель по данным дистанционного зондирования// International Agricultural Journal. – 2023. – Т. 66, № 1. – С. 69–86.
8. Михайленко И.М. Теоретические основы и техническая реализация управления агротехнологиями. – СПб.: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2017. – 252 с.
9. Сальников С.Г., Тухина Н.Ю. Геоинформационные системы как базовая система информационного обеспечения сельского хозяйства// Вестник Московского гуманитарно-экономического института. – Москва, 2018. – № 4. – С. 100–103.
10. Pisman T.I., Botvich I.Y., Sidko A.F. Assessment of agroecosystem productivity based on satellite data and a mathematical model// Journal of Siberian Federal University. Engineering and Technologies. – 2015. – Vol. 1, № 8. – P. 133–140.
11. Сахарова Е.Ю., Сладких Л.А., Захватов М.Г. Спутниковый мониторинг состояния посевов и прогнозирование урожайности зерновых культур на юге Западной Сибири// Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология». – Новосибирск: СГГА, 2014. – Т. 1. – С. 67–72.
12. Homolová L., Malenovský Z., Clevers J.G., Garcia-Santos G., Schaepman M.E. Review of optical-based remote sensing for plant trait mapping// Ecological Complexity. – 2013. – Vol. 15. – P. 1–16.
13. Комарова А.Ф., Журавлёва И.В., Яблоков В.М. Открытые мультиспектральные данные и основные методы дистанционного зондирования в изучении растительного покрова// Принципы экологии. – 2016. – № 1. – С. 40–71.
14. Gusev V.N., Bastaubayeva Sh.O., Khidirov A.E., Zhusupbekov E.K., Tabynbayeva L.K. Nitrogen nutrition of crop plants in the precision farming system in the south and southeast Kazakhstan// SABRAO Journal of Breeding and Genetics. – 2022. – Vol. 54(4). – P. 842–850.
15. Малышевский В.А., Фёдоров Ю.П. и др. Расчёт содержания гумуса с использованием данных дистанционного зондирования Земли// Научный журнал КубГАУ. – 2013. – № 92(08). – С. 859–883.
16. Украинский П.А., Нарожняя А.Г., Гагина И.С. К вопросу о возможности моделирования связи содержания гумуса и спектральной отражательной способ-

ности почвы на основе данных традиционных агрохимических обследований и многозональных спутниковых снимков LANDSAT 8 OLI// Аграрный научный журнал. – 2015. – № 12. – С. 29–32.

17. Савельев А.А., Григорьян Б.Р., Добрынин Д.В., Мухарамова С.С., Кулагина и др. Оценка почвенного плодородия по данным дистанционного зондирования Земли// Ученые записки Казанского университета. Серия «Естественные науки». – 2012. – Т. 154, кн. 3. – С. 158–172.

18. Якушев В.П., Якушев В.В., Блохина С.Ю. и др. Роль дистанционного зондирования Земли в точном земледелии// Вестник Российской академии наук. – 2023. – Т. 93, № 10. – С. 955–969.

19. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Агропромиздат, 1985. – 351 с.

20. Сычѳв В.Г., Афанасьев Р.А., Кирсанов Г.А. и др. Возможности дистанционной диагностики минерального питания растений// Плодородие. – 2020. – № 2. – С. 13–17.

21. Осипов Ю.Ф., Иваницкий Я.В., Ширинян М.Х., Афанасьев Р.А., Галицкий В.В. Использование прибора N-тестер «Яра» для диагностики азотного питания озимой пшеницы// Плодородие. – 2011. – № 1. – С. 26–29.

22. Афанасьев Р.А. Дистанционная диагностика азотного питания растений с использованием БПЛА// Плодородие почв России: состояние и возможности. – М.: ВНИИА, 2019. – С. 191–196.

REFERENCES

1. Berdengaliev A.N., Berdengaliev R.N. Svyazь sezonnoi dinamiki ozimoi pshenitsy i relьefa v podzone yuzhnykh chernozemov Volgogradskoi oblasti// Nauchno-agronomicheskii zhurnal. – 2022. – № 3(118). – S. 49–56.

2. Manaenkov A.S., Korneeva E.A. Biogeograficheskie aspekty otsenki effektivnosti zashchity pakhotnykh zemelь lesnymi polosami// Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5: Geografiya. – 2021. – № 3. – S. 48–54.

3. FAO. The future of food and agriculture – Trends and challenges. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2017.

4. Hendricks G.S., Shukla S., Roka F.M. et al. Economic and environmental consequences of overfertilization under extreme weather conditions// Journal of Soil and Water Conservation. – 2019. – Vol. 74. – P. 160–171.

5. Kholodov O.A. Kompleksnyi monitoring ispolьzovaniya zemelь selьskokhozyaistvennogo naznacheniya v sovremennyi period// Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya «Ekonomika». – Volgograd, 2019. – № 3. – S. 107–119.

6. Bogdanova O.V., Okmyanskaya V.M., Sizov A.P. Analiz sistemy monitoringa obьektov osobo okhranyaemykh prirodnykh territorii na primere Tyumenskoi oblasti// Ispolьzovanie i okhrana prirodnykh resursov v Rossii. – Tyumenь, 2019. – № 3(159). – S. 72–77.

7. Martynova N.G., Kravchenko V.G. Monitoring selьskokhozyaistvennykh zemelь po dannym distantsionnogo zondirovaniya// International Agricultural Journal. – 2023. – Т. 66, № 1. – S. 69–86.

8. Mikhailenko I.M. Teoreticheskie osnovy i tekhnicheskaya realizatsiya upravleniya agrotekhnologiyami. – SPb.: Sankt-Peterburgskii politekhnicheskii universitet Petra Velikogo, 2017. – 252 s.

9. Saľnikov S.G., Tukhina N.Yu. Geoinformatsionnye sistemy kak bazovaya sistema informatsionnogo obespecheniya sel'skogo khozyaistva// Vestnik Moskovskogo gumanitarno-ekonomicheskogo instituta. – Moskva, 2018. – № 4. – S. 100–103.

10. Pisman T.I., Botvich I.Y., Sidko A.F. Assessment of agroecosystem productivity based on satellite data and a mathematical model// Journal of Siberian Federal University. Engineering and Technologies. – 2015. – Vol. 1, № 8. – P. 133–140.

11. Sakharova E.Yu., Sladkikh L.A., Zakhvatov M.G. Sputnikovyi monitoring sostoyaniya posevov i prognozirovanie urozhainosti zernovykh kul'tur na yuge Zapadnoi Sibiri// Interekspo GEO-Sibir'–2014. Mezhdunar. nauch. konf. «Distsionnye metody zondirovaniya Zemli i fotogrammetriya, monitoring okruzhayushchei sredy, geokologiya». – Novosibirsk: SGGa, 2014. – T. 1. – S. 67–72.

12. Homolova L., Malenovský Z., Clevers J. G., Garcia-Santos G., Schaepman M. E. Review of optical-based remote sensing for plant trait mapping// Ecological Complexity. 2013. Vol. 15. P. 1–16.

13. Komarova A.F., Zhuravleva I.V., Yablokov V.M. Otkrytye mul'tispektral'nye dannye i osnovnye metody distantsionnogo zondirovaniya v izuchenii rastitel'nogo pokrova// Printsipy ekologii. – 2016. – № 1. – S. 40–71.

14. Gusev V.N., Bastaubayeva Sh.O., Khidirov A.E., Zhusupbekov E.K., Tabynbayeva L.K. Nitrogen nutrition of crop plants in the precision farming system in the south and southeast Kazakhstan// SABRAO Journal of Breeding and Genetics. – 2022. – Vol. 54(4). – P. 842–850.

15. Malyshevskii V.A., Fedorov Yu.P. i dr. Raschet sodержaniya gumusa s ispol'zovaniem dannykh distantsionnogo zondirovaniya Zemli// Nauchnyi zhurnal KubGAU. – 2013. – № 92(08). – S. 859–883.

16. Ukrainskii P.A., Narozhnyaya A.G., Gagina I.S. K voprosu o vozmozhnosti modelirovaniya svyazi sodержaniya gumusa i spektral'noi otrazhatel'noi sposobnosti pochvy na osnove dannykh traditsionnykh agrokhimicheskikh obsledovaniy i mnogo-zonal'nykh sputnikovykh snimkov LANDSAT 8 OLI// Agrarnyi nauchnyi zhurnal. – 2015. – № 12. – S. 29–32.

17. Savel'ev A.A., Grigor'yan B.R., Dobrynin D.V., Mukharamova S.S., Kulagina i dr. Otsenka pochvennogo plodorodiya po dannym distantsionnogo zondirovaniya Zemli// Uchenye zapiski Kazanskogo universiteta. Seriya «Estestvennye nauki». – 2012. – T. 154, kn. 3. – S. 158–172.

18. Yakushev V.P., Yakushev V.V., Blokhina S.Yu. i dr. Rol' distantsionnogo zondirovaniya Zemli v tochnom zemledelii// Vestnik Rossiiskoi akademii nauk. – 2023. – T. 93, № 10. – S. 955–969.

19. Dospikhov B.A. Metodika polevogo opyta (s osnovami statisticheskoi obrabotki rezul'tatov issledovaniy). – 5-e izd., pererab. i dop. – M.: Agropromizdat, 1985. – 351 s.

20. Sychev V.G., Afanas'ev R.A., Kirsanov G.A. i dr. Vozmozhnosti distantsionnoi diagnostiki mineral'nogo pitaniya rasteniy// Plodorodie. – 2020. – № 2. – S. 13–17.

21. Osipov Yu.F., Ivanitskii Ya.V., Shirinyan M.Kh., Afanas'ev R.A., Galitskii V.V. Ispol'zovanie pribora N-tester «Yara» dlya diagnostiki azotnogo pitaniya ozimoi pshenitsy// Plodorodie. – 2011. – № 1. – S. 26–29.

22. Afanas'ev R.A. Distsionnaya diagnostika azotnogo pitaniya rasteniy s ispol'zovaniem BPLA// Plodorodie pochv Rossii: sostoyanie i vozmozhnosti. – M.: VNIIA, 2019. – S. 191–196.

ТҮЙІН

С.Б. Кененбаев^{1*}, В.Н. Гусев^{1*}, А.М. Сағымбаева¹, Қ.У. Рүстемова¹

КҮЗДІК БИДАЙДЫҢ СУАРМАЛЫ АШЫҚ ҚОҢЫР ТОПЫРАҚТАРЫНДАҒЫ ҚОРЕКТЕНУ ЭЛЕМЕНТТЕРІМЕН ЖӘНЕ ӨНІМДІЛІГІМЕН ҚАМТАМАСЫЗ ЕТІЛУІН ҚАШЫҚТЫҚТАН ДИАГНОСТИКАЛАУ

*«Қазақ егіншілік және өсімдік шаруашылығы ғылыми-зерттеу институты»
ЖШС, 040909, Алматы облысы, Қарасай ауданы, Алмалыбақ, Ерлепесов көшесі, 1,
Қазақстан, *e-mail: serikkenenbayev@mail.ru; agfaagro@mail.ru*

Мақалада жерді қашықтықтан зондтаудың нақты егіншілік жүйесіндегі рөлі бағаланды. Тыңайтқыштарды саралап қолдану үшін өсімдіктердің азотпен және фосформен қоректенуінің өсімдік және топырақ диагностикасының маңыздылығы зерттеліп, күздік бидайдың азотпен қоректену деңгейіне тікелей тәуелді спектрлік көрсеткіштері анықталды. Қолданылатын минералды азот нормасының 60-тан 180 кг/га-ға артуы NDVI көрсеткіштерін 0,64-тен 0,72-ге дейін өсірді. 20-60 т/га көңнің кейінгі әсері бұл көрсеткіштерді неғұрлым тар шектерде – 0,62-ден 0,67-ге дейін өзгертті. Калий тыңайтқыштары NDVI көрсеткіштерін іс жүзінде өзгертпеді, олардың қолдану қарқынының жоғарылауымен төмендеу үрдісі бар. Өсімдіктердегі азот пен хлорофилл мөлшері мен астық шығымдылығы арасындағы байланыс есептелді. Оның негізінде астық шығымының әртүрлі деңгейлері үшін азотпен қамтамасыз ету көрсеткіштері және «жасылдық» көрсеткіштері алынды. Портативті фотометрлердің көмегімен NDVI индексінің көрсеткіштерін пайдалану азотпен қоректенуді диагностикалаудың дәстүрлі әдісінен кем түспейтіні және егістік танабындағы гетерогенділіктің қарқындылығы мен күздік бидайдың қажеттілігін сандық бағасын белгілеу үшін нақты егіншілік жүйесінде тиімді пайдаланылуы мүмкін екендігі анықталды.

Түйінді сөздер: Қашықтықтан зондтау, минералды қоректену, күздік бидай, шығымдылық, NDVI.

SUMMARY

S.B. Kenenbaev^{1*}, V.N. Gusev^{1*}, A.M. Sagimbaeva¹, K.U. Rustemova¹

REMOTE DIAGNOSTICS OF SOIL NUTRIENT SUPPLY AND YIELD OF WINTER WHEAT ON IRRIGATED LIGHT CHESTNUT SOILS

*LLP "Kazakh Research Institute of Agriculture and Plant Growing", 040909, Almaty region, Karasai district, Almalybak, st. Erlepesov, 1, Kazakhstan,
e-mail: serikkenenbayev@mail.ru; agfaagro@mail.ru;

The article evaluates the role of remote sensing in the precision farming system. It has been found that plant and soil diagnostics of nitrogen and phosphorus nutrition play a primary role in the differentiated application of fertilizers. Spectral indices directly dependent on the level of nitrogen nutrition in winter wheat have been identified. Increasing the rate of applied mineral nitrogen from 60 to 180 kg/ha increased NDVI values from 0.64 to 0.72. The residual effect of manure application at 20–60 t/ha altered these values within a narrower range, from 0.62 to 0.67. Potassium fertilizers had little effect on NDVI values, with a slight tendency to decrease as application rates increased. The correlation between nitrogen and chlorophyll content in plants and grain yield was calculated, based on which nitrogen sufficiency indices and "greenness" indices were obtained for different grain yield levels. With the help of portable photometers of NDVI indices obtained with portable photometers is comparable to traditional methods of nitrogen nutrition diagnostics and can be effectively used in precision farming to quantitatively assess the degree of in-field heterogeneity and the nitrogen needs of winter wheat crops.

Keywords: Remote sensing, mineral nutrition, winter wheat, yield, NDVI.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

1. Кененбаев Серик Барменбекович - главный научный сотрудник лаборатории почвоведения и агрохимии, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1745-8475>,

e-mail: serikkenenbayev@mail.ru

2. Гусев Виталий Николаевич - ведущий научный сотрудник лаборатории почвоведения и агрохимии, кандидат сельскохозяйственных наук, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7309-5790>, e-mail: agfaagro@mail.ru;

3. Сагимбаева Айна Муратовна - научный сотрудник лаборатории почвоведения и агрохимии, магистр сельскохозяйственных наук, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1481-2187>, e-mail: ainasagimbaeva_78@mail.ru

4. Рустимова Карлыга Усенгалиевна - младший научный сотрудник лаборатории почвоведения и агрохимии, магистр сельскохозяйственных наук, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5086-2790>, e-mail: karligaw_91@bk.ru

ГРНТИ 68.33.29

DOI: 10.51886/1999-740X_2025_4_51

Р.Х. Рамазанова¹, К.К. Мусаева^{1*}, Н.С. Асимжанов¹, З.А. Зарип¹, А.К. Абай¹
АГРОХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СЕРОЗЁМА СВЕТЛОГО ПРИ ПРИМЕНЕНИИ
БИОСТИМУЛЯТОРОВ И МИКРОУДОБРЕНИЙ ПРИ ВОЗДЕЛЫВАНИИ САХАРНОЙ
СВЁКЛЫ В УСЛОВИЯХ ЖАМБЫЛСКОЙ ОБЛАСТИ

*¹Казахский научно-исследовательский институт почвоведения и агрохимии
имени У.У. Успанова, 050060, Алматы, пр. аль – Фараби, 75В, Казахстан,*

**e-mail: mkuralai_97@mail.ru*

Аннотация. В работе представлены результаты исследований, проводившихся на светлых серозёмах Жамбылской области, по изменению агрохимических свойств почвы при применении внекорневых подкормок растений сахарной свёклы биостимуляторами и микроудобрениями на фоне основного минерального питания. Выявлен опосредованный эффект от листовой обработки растений биостимуляторами *Amino Turbo, Acadian goldstar, Everbest Amino* и микроудобрениями *Boromol, Nitrogeno, Terra Organico* в различные фазы развития растений на изменение агрохимических показателей почвы. Дополнительное внекорневое питание биостимуляторами и микроудобрениями способствовало повышению содержания доступных форм азота и фосфора до максимального поглощения элементов питания в течение вегетации, что обеспечивает получение дополнительного урожая корнеплодов. Микроэлементы демонстрируют фазовую чувствительность: бор достаточно внести фоново один раз, цинк требует двукратного применения. Предложенная схема - НРКфон до посева; *Amino turbo* и *Boromol* в 2-3 и 6-8 листьев; *Nitrogen* и *Terra organico* при смыкании - обеспечивает равномерное поступление и сохранение питательных веществ. Полученные данные подтверждают целесообразность применения комплексной схемы листового питания с использованием биостимуляторов и микроудобрений при возделывании сахарной свёклы на светлых серозёмах.

Ключевые слова: серозём, агрохимические показатели, гумус, биостимулятор, микроудобрение, минеральное питание, элементы питания, сахарная свёкла.

ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях, на фоне глобальных вызовов в агропромышленном комплексе особенно возрастает необходимость повышения продуктивности сельскохозяйственных культур. Согласно прогнозам ООН, к 2050 году численность населения Земли достигнет 9,5 миллиарда человек, и по мере демографического роста проблема обеспечения продовольствием приобретает всё более острый и комплексный характер [1].

Решение проблемы – совершенствование агротехнологий как средств устойчивого повышения урожайности. В частности, за счет включения в практику листовых подкормок с аминокислотами, микроэлементами и экстрактами водорослей [2-4]. Это особенно

актуально на почвах с низким уровнем естественного плодородия и при выращивании стратегически важных культур.

Для Казахстана одной из таких культур является сахарная свёкла, выступающая основным сырьевым источником важнейшего продукта питания - сахара. Традиционным регионом возделывания сахарной свёклы является Жамбылская область [5]. Сахарная свёкла обладает высоким потенциалом продуктивности при условии соблюдения оптимальных агротехнологических требований. Особенностью её биологии является интенсивное потребление питательных веществ в процессе формирования урожая корнеплодов, что обуславливает высокие требования к почвенным условиям, требующим

регулярной оценки и корректировки системы питания на основе применения удобрений [6-8].

В период интенсивной химизации сельского хозяйства агрохимический баланс почв складывался таким образом, что поступление питательных веществ с удобрениями значительно превышало их вынос с урожаем. Это способствовало повышению её эффективного плодородия [9, 10]. В настоящее время объёмы внесения удобрений существенно сократились, тогда как вынос элементов питания с урожаем остаётся высоким. Это приводит к снижению уровня плодородия и ухудшению условий для роста и развития сельскохозяйственных культур [11, 12].

В этой связи, на светлых серозёмах Жамбылской области проведено научное исследование по оценке эффективности системы удобрения сахарной свёклы, включающей основное и внекорневое питание, с целью изучения

динамики изменений агрохимических свойств орошаемых почв при применении новых форм биостимуляторов и микроудобрений.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объекты исследования – серозёмы светлые. Полевые исследования проводились в условиях КХ «Нұр и К» Жамбылской области.

Полевые опыты заложены в трехкратной повторности, площадь учетных делянок 100 м² (10м×10м). Посев сахарной свёклы (гибрид VIORICA KWS - оригинатор KWS SAAT SE, Германия) произведен 11 апреля, норма высева 1,4 кг/га, расстояние в междурядьях 45 см. Полив сахарной свёклы – традиционный по бороздам.

Схема опыта включала применение внекорневой обработки посевов сахарной свёклы в фазах появления 2-3, 6-8 листьев и смыкания листьев в рядках. На рисунке 1 представлена схема расположения полевого опыта.



Рисунок 1 - Схема расположения полевого опыта

Для внекорневых подкормок применяли новые биостимуляторы и микроудобрения казахстанского и зарубежного производства в соответствии с рекомендациями производителя (во избежание стрессовых ситуаций при изменении концентраций): Boromol – 2 л/га/200 л воды, Terra organico – 4,0 л/га/1000 л воды, Nitrogeno – 2,5 л/га/1000 л воды, Amino turbo – 100 г/га/100 л воды, Acadian goldstar –

500 г/га/ 500 л воды, Everbest Amino – 0,25 л/га/100 л воды с перерасчетом на площадь делянки. Boromol - жидкое удобрение содержит водорастворимые В (8%) и Мо (2%); Terra organico – жидкое удобрение, содержит ОВ (48%), Сорг (17%), Нобц (1%), водорастворимый калий (2%); Nitrogeno+ - жидкое удобрение, содержит Нобц (20%), N-NH₂ (20%), водорастворимые В (1%) и Zn 0,7%; Amino turbo – порошок, универ-

сальный биостимулятор нового поколения на основе высоко-насыщенного сбалансированного комплекса аминокислот, содержит Сорг (39%), Норг (12,8%), свободные аминокислоты (80%), общие аминокислоты (85%), – 85,0%; Acadian goldstar - водорастворимый порошок - 100% экстракт морских водорослей, содержит ОВ (44-55%), алгиновая кислота (>10%), маннитол (4-6%), аминокислоты (4%), фукоидан (>12%), пр. олигосахариды (>16%); Everbest Amino - жидкое удобрение, содержит ОВ (50%), Сорг (22%), Норг (7%), свободные аминокислоты (12%).

Листовые обработки проводились на фоне основного внесения удобрений, принятого в хозяйстве: аммофос (N:P - 12:52), сульфат калия (K50), внесенных осенью под основную обработку почвы и аммиачная селитра (N34,4) под предпосевную культивацию. Нормы рассчитаны с учетом уровня обеспеченности почвы.

Для агрохимической характеристики почвы опытного участка перед закладкой опыта было отобрано 12 смешанных образцов из слоев 0–20 см и 20–40 см. В течение вегетации культуры, почвенные образцы отбирались после проведения каждой обработки и перед уборкой сахарной свёклы на глубину 0-20 см и 20-40 см.

Анализы почвенных образцов выполнены в испытательной лаборатории Казахского научно-исследовательского института почвоведения и агрохимии имени У. У. Успанова: общий гумус – по Тюрину, легкогидролизуемый азот – по Тюрину Кононовой,

подвижный фосфор и обменный калий – по Мачигину; рН – потенциметрически. Массовая доля цинка и бора определялась атомно-абсорбционным методом по ГОСТ 53218-2008. Аналитические методы подробно изложены в руководстве по общему анализу почв [13, 14].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В охватываемый исследованиями период весеннее повышение температуры происходило постепенно, и в апреле средняя температура составляла около +10 °С. Летний период характеризовался средней температурой +25 °С, при максимальных значениях в июле до +35 °С. К моменту уборки урожая в октябре средние температуры опускались до +10 °С. Распределение осадков отличается выраженной неравномерностью: в зимний период выпадает 30–50 мм осадков, весной - около 100–150 мм, летом - порядка 50–70 мм, осенью - 40–60 мм.

Почвенный покров опытного участка представлен светлыми серозёмами, содержание гумуса в целинных аналогах составляет около 2%. Светлые сероземы обладают хорошей микроструктурой, высокой водопроницаемостью и развитой пористостью, что обеспечивает их высокую продуктивность при условии интенсивного орошения и применения удобрений.

Как показывают данные таблицы 1, содержание общего гумуса в пахотном слое 0–20 см оказалось ниже, чем в целинных вариантах, и варьировало в пределах 1,47–1,84% при среднем значении 1,72%.

Таблица 1 - Агрохимическая характеристика почвы опытного участка

Глубина взятия образца, см	Содержание гумуса, %	рН	Содержание подвижных форм, мг/кг		
			Нлг	P ₂ O ₅	K ₂ O
0-20	1,72±0,05	8,0	56,5	135,7	321,0
20-40	1,58±0,04	8,0	54,3	60,7	267,0

Содержание легкогидролизуемого азота в пахотном слое (0-20 см) в среднем составило 56,5 мг/кг с колебаниями от 73,5 мг/кг до 38,5 мг/кг, что соответствует повышенной степени обеспеченности. По содержанию подвижного фосфора отмечается сильная вариабельность от 54 мг/кг до 256 мг/кг и в среднем характеризует почвы как высокообеспеченные, разница в содержании обменного калия была не такая значительная - от 300 до 330 мг/кг почвы. Реакция почвенной среды – 7,54-8,36, что соответствует слабощелочной и среднещелочной группе. В слое почвы 20-40 см значения показателей были ниже, но закономерность аналогична.

Одним из ключевых показателей почвенного плодородия является содержание органического вещества (гумуса) [15]. Формирование гумуса определяет-

ся не только уровнем применения удобрений, но и количеством образующейся растительной массы, которая в дальнейшем становится основным источником органического вещества. В этом контексте листовые удобрения, несмотря на то что вносятся непосредственно на поверхность листьев и не взаимодействуют с почвой напрямую, способны оказывать опосредованное влияние на гумусообразование за счет стимулирования процессов накопления биомассы и дополнительного поступления в почву органики [16].

Нашими исследованиями установлено, что испытываемые агрохимические средства оказали влияние на повышение содержания гумуса в почве, за счет новообразованных форм, повысив его содержание с 1,78% на контроле до 1,83–1,88% (таблица 2).

Таблица 2 - Состав гумуса серозёма светлого под посевами сахарной свёклы

Вариант	Гумус, %	ВРОВ, мг/кг
Контроль	1,78	0,292
НРК - фон	1,83	0,287
НРК + Boromol	1,88	0,287
НРК + Terra organico	1,83	0,272
НРК + Nitrogeno+	1,71	0,277
НРК + Amino turbo	1,74	0,292
НРК + Acadian goldstar	1,77	0,307
НРК + Everbest Amino	1,87	0,277

Это указывает на различную степень воздействия исследуемых препаратов на процессы гумификации и минерализации органического вещества.

Положительное действие минеральных удобрений и на их фоне изучаемых факторов вероятно обусловлено комплексным воздействием на физиологические процессы, приводящие к увеличению биомассы растений, активизации полезной почвенной микрофлоры, ускорению процессов разложения остатков и новообразования гумуса.

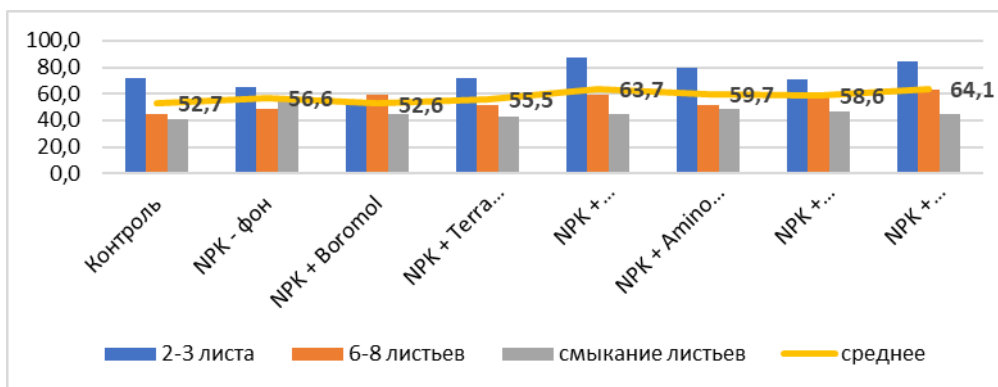
В образовании гумуса почвы играет большую роль водорастворимый

гумус (*ВРОВ – водорастворимое органическое вещество*). Показатель содержания водорастворимого гумуса используют для оценки почвенного плодородия и биологической активности почвы и это один из индикаторов эффективности органических удобрений [17-19].

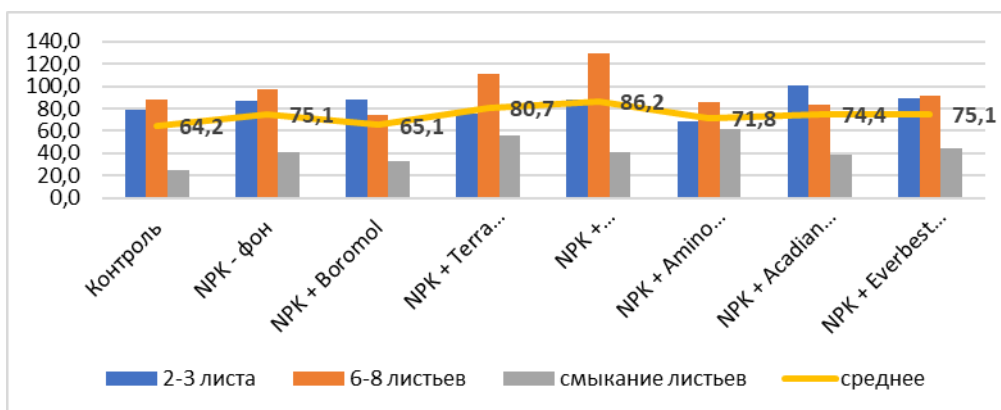
Содержание ВРОВ находилось в пределах 0,272–0,307 мг/кг. Наибольшее значение зафиксировано в варианте с *Acadian goldstar* (0,307 мг/кг), что может свидетельствовать о повышенной подвижности органических соединений и их доступности для микробиоты.

К агрохимическим параметрам почвенного плодородия относятся показатели содержания подвижных форм, доступных для питания растений – азот легкогидролизуемый, фосфор подвижный и калий обменный [20-25]. На осно-

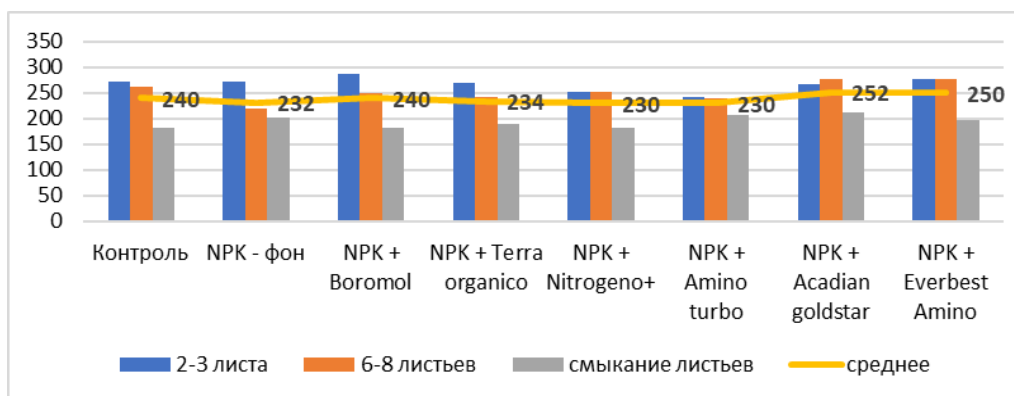
вании анализа данных, представленных на рисунке 2, установлено, что листовая обработка посевов сахарной свёклы оказала влияние на динамику элементов питания в серозёме светлом на фоне NPK.



а) легкогидролизуемый азот



б) подвижный фосфор



в) обменный калий

Рисунок 2- Динамика содержания элементов питания серозема светлого под посевами сахарной свёклы, мг/кг

На контрольном варианте содержание легкогидролизуемого азота остается на уровне низкой и средней обеспеченности на протяжении всей вегетации – 52,7 мг/кг, что обусловлено отсутствием поступления элемента извне, а поступление этой формы азота было только за счёт минерализации гумуса.

Внесение минеральных удобрений повлияло на увеличение содержания легкогидролизуемого азота в ранние фазы роста, с последующим снижением из-за активного потребления растениями. Отмечается чёткое повышение в начале вегетации с дальнейшим плавным снижением.

Максимальные значения были зафиксированы на вариантах с применением *Nitrogeno+*, *Amino turbo* и *Everbest Amino* – 63,7, 59,7 и 64,1 мг/кг соответственно. Это связано с особенностями поведения азотистых соединений в составе удобрений (доступные формы азота, стимуляция азотного обмена за счет аминокислот) и возможной активацией микробиологических процессов, повышающих минерализацию органического вещества.

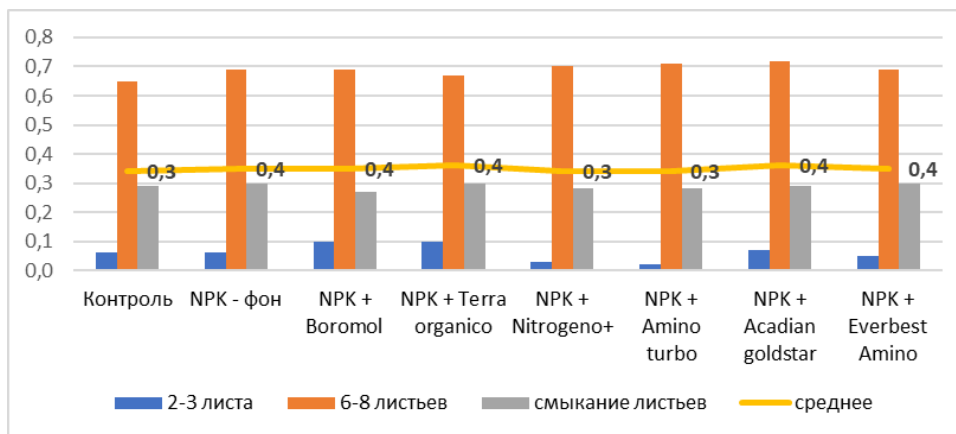
Действие листовой обработки *Boromol* сопоставимо с контрольным вариантом – 52,6 мг/кг, и вероятно это объясняется отсутствием в составе удобрений органических и азотсодержащих соединений. При обработке удобрением *Terra organico* обеспечивались стабильные уровни повышенной обеспеченности этой формы азота – 55,5 мг/кг интегральное содержание за вегетацию, что указывает на пролонгированное действие органической составляющей. Аналогично этому варианту применение *Acadian goldstar* имело такой же характер динамики, но значения были выше – 58,6 мг/кг. В целом надо отметить, что листовые удобрения способствовали стабилизации этой формы азота на уровне средней обеспеченности.

Анализ содержания подвижного фосфора (P_2O_5) в серозёме светлом показал существенные различия в зависимости от сроков вегетации и используемых удобрений (рисунок 2б). Полученные данные подтверждают, что использование листовых удобрений на фоне NPK позволяет удерживать высокий уровень подвижного фосфора, обеспечивая стабильное фосфорное питание. Общая закономерность в содержании фосфора по вариантам опыта – его постепенное снижение к концу вегетации за счет его потребления растениями и закреплением в труднорастворимых формах.

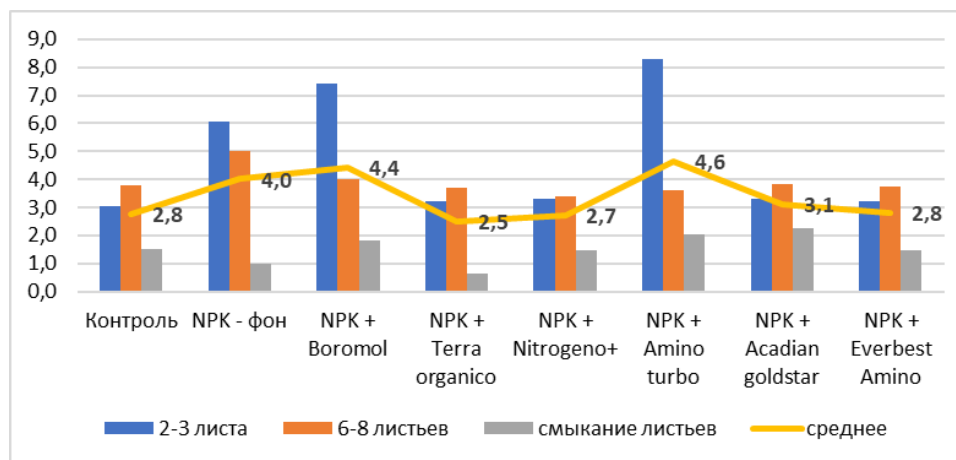
На контроле к фазе смыкания его уровень снижается почти в три раза – до 24,7 мг/кг против 79,3 мг/кг в начале вегетации. Поэтому необходим периодический мониторинг содержания фосфора, поскольку в противном случае он может проявить себя как элемент лимитирующий урожай. По остальным вариантам применение листовых удобрений обеспечивало поддержание фосфора в почве выше 30 мг/кг. Наиболее выраженное накопление фосфора наблюдалось на варианте *Nitrogeno+* и *Terra organico* на фоне NPK, где содержание в фазу 6–8 листьев достигло 130,0 и 110,7 мг/кг, а среднее значение составило 86,2 и 80,7 мг/кг соответственно. Это может быть связано с усилением корневого питания, активной мобилизацией фосфора и стимуляцией обменных процессов. Действие *Amino turbo*, *Acadian goldstar* и *Everbest Amino* имело почти одинаковый эффект 71,8 – 75,1 мг/кг. Вероятно, они способствовали улучшению растворимости фосфатов и их удержанию в доступной форме в течение всей вегетации благодаря возможной мобилизации фосфора органическими кислотами. Таким образом, обеспеченность растений фосфором может поддерживаться за счет действия внекорневых подкормок биостимуляторами и микроудобрениями.

По вариантам опыта в средне-сезонном содержании обменного калия в почве особых колебаний не отмечено, оно было в пределах 230-252 мг/кг почвы. На контроле средне сезонное содержание обменного калия – 240 мг/кг почвы несколько превышает варианты с удобрениями, за исключением вариан-

тов с *Acadian goldstar* и *Everbest Amino*. На варианте с применением *Boromol* эффект влияния незначительный – уровень содержания элемента примерно, как на контроле. Вероятно, затраты калия на формирование урожая меньше, чем на вариантах с удобрениями.



а) бор



б) цинк

Рисунок 3 - Динамика микроэлементов в почве под посевами сахарной свёклы, мг/кг

Бор и цинк – это незаменимые компоненты эффективной агротехнологии выращивания сахарной свёклы. Они улучшают агрохимические и биологические свойства почвы, обеспечивая сбалансированное питание и устойчивость растений к стрессам, способствуют устойчивому росту урожайности.

Бор играет важную роль в жизни растений, потребность в нем усиливают повышенные дозы калийных удобрений или высокое содержание калия в почве [26]. Также в карбонатных и щелочных почвах бор быстро становится недоступным – даже при содержании выше оптимального в таких почвах, может

проявляться физиологический дефицит [27]. В таких условиях особенно эффективна листовая подкормка бором в ранние критические фазы – не позднее 4–6 листьев и начало формирования корнеплода [28].

Как видно из рисунка 3, интегральное содержание элемента по вариантам опыта, находится в пределах 0,3-0,4 мг/кг. При этом во всех вариантах наблюдается резкое увеличение содержания бора от фазы 2–3 листьев до фазы 6–8 листьев – 0,65-0,72 мг/кг. Это связано смобилизацией элемента, а также действием внекорневых обработок.

В связи с этим применение внекорневых подкормок является важным агротехническим приёмом для обеспечения полноценного борного питания.

Помимо бора, сахарная свёкла отличается повышенным выносом цинка. Значение цинка для роста растений тесно связано с его участием в азотном обмене и улучшением хозяйственно-ценных признаков. Доступность Zn снижается с повышением рН почвы [29].

Наиболее выраженное увеличение содержания цинка в начальной фазе (2–3 листа) отмечается на вариантах *Amino turbo* (8,30 мг/кг) и *Boromol* (7,40 мг/кг), что указывает на интенсивное поступление элемента в верхний слой почвы после внесения. Однако к фазе смыкания листьев наблюдается значительное снижение содержания подвижного цинка почти во всех вариантах, что отражает его быстрое поглощение растениями и возможное вымывание. Самое стабильное и высокое среднее значение за весь вегетационный период отмечено на варианте с *Amino turbo* - 4,64 мг/кг и *Boromol* - 4,41 мг/кг, несколько ниже показатели на фоне NPK - 4,01 мг/кг.

То есть внекорневые обработки с добавлением микроэлементов, особенно в составе *Amino turbo* и *Boromol*, эффективно насыщают почву подвижным цинком в начальные фазы, однако

для устойчивого обеспечения культуры необходимо либо повторное внесение, либо использование форм с пролонгированным действием.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Серозёмы светлые характеризуются невысокой гумусностью, что обуславливает быстрый переход питательных элементов в недоступные формы и их выщелачивание. В таких условиях формирование урожайности и сахаристости корнеплодов напрямую зависит от точного фазового внесения удобрений.

При внесении основного удобрения (NPK) в почву обеспечивается содержание 41,8 - 87,5 мг/кг Nлг, 72,3–100 мг/кг P2O5 и 256,7–290,7 мг/кг K2O. Дополнительное питание биостимуляторами и микроудобрениями по листу, в частности *Amino turbo* и *Nitrogen*, способствовало повышению содержания Nлг до 93,2 мг/кг и P2O5 до 130,0 мг/кг к фазе смыкания листьев. Для калия оптимальным вариантом является применение *Boromol* в ранние фазы - до 286,7 мг/кг и *Terra organico* в поздние фазы 293,3 мг/кг. Микроэлементы демонстрируют фазовую чувствительность: бор достаточно внести фоновый раз, цинк требует двукратного применения. Предложенная схема - NPKфон до посева; *Amino turbo* и *Boromol* в 2-3 и 6-8 листьев; *Nitrogen* и *Terra organico* при смыкании - обеспечивает равномерное поступление и сохранение питательных веществ.

Полученные данные подтверждают целесообразность использования комбинированных подходов к питанию сахарной свёклы с включением биостимулирующих препаратов и микроудобрений. Внедрение данной стратегии позволит стабилизировать агрохимические свойства почвы, повысить урожайность сахарной свёклы и снизить экологическую нагрузку за счёт сокращения избыточного применения удобрений.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследования профинансированы Министерством сельского хозяйства РК (BR 22885097 "Обеспечение рационального использования земель сельскохозяйственного назначения в интенсивном земледелии на основе новых подходов в сохранении и воспроизводстве плодородия почв").

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. United Nations. Population [Elektronnyy resurs]. - Rezhim dostupa: <https://www.un.org/ru/global-issues/population>. - Data obrashcheniya: 25.06.2024.
2. Krause U., Koch H.-J., Maerlaender B. Soil properties effecting yield formation in sugar beet under ridge and flat cultivation// European Journal of Agronomy. – 2009. – Vol. 31, Issue 1. – P. 20–28.
3. Lebedeva M.P., Chizhikova N.P. Effect of fertilizers on agrochemical properties of soils and humus status// Eurasian Soil Science. – 2021. – Vol. 54, № 8. – P. 1041–1051.
4. Draycott A.P., Christenson D.R. Nutrient Management for Sugar Beet Production. – Wallingford: CABI Publishing, 2003. – P. 11–78.
5. Рекомендации по инновационным технологиям производства и хранения сахарной свёклы в условиях юго-востока Казахстана. – Астана, 2024. – 25 с.
6. Hans B., Vermeulen G.D., Tijink F.G.J., Koch H.-J., Märlander B. Analysis of soil characteristics, soil management and sugar yield on top and averagely managed farms growing sugar beet (*Beta vulgaris* L.) in the Netherlands// Soil and Tillage Research. – 2011. – Vol. 117. – P. 61–68.
7. Сычев В.Г., Шафран С.А. Агрохимические свойства почв и эффективность минеральных удобрений. – М.: ВНИИА, 2013. – 296 с.
8. Ильюшенко И.В. Оценка влияния агрохимических свойств чернозема обыкновенного на эффективность минеральных удобрений при внесении под сахарную свёклу// Плодородие. – 2014. – № 4. – С. 6–7.
9. Швыркина С.В. Влияние агрохимических свойств дерново-подзолистых и серых лесных почв на эффективность применения минеральных удобрений под картофель: автореф. дис. ... к.с.-х.н. – М.: ВНИИА, 2014. – 25 с.
10. Козеичева Е.С. Влияние агрохимических свойств почв Центрального Нечерноземья на эффективность азотных удобрений: автореф. дис. .. к.б.н. – М.: ВНИИА, 2011. – 23 с.
11. Ivanova E.A., Kudeyarov V.N. The role of organic matter in maintaining agrochemical soil properties// Eurasian Soil Science. – 2023. – Vol. 56, № 3. – P. 354–363. –
12. Shoba S.A., Khokhryakova O.N. Long-term effects of different fertilizer systems on soil fertility and crop yields// Agronomy Research. – 2021. – Vol. 19, № 3. – P. 1234–1245.
13. Аринушкина Е.В. Руководство по химическому анализу почв. – М.: МГУ, 1962. – 491 с.
14. Александрова Л.Н., Найденова О.А. Лабораторно-практические занятия по почвоведению. – Л.: Агропромиздат, 1986. – 295 с.
15. Ермаков В.В. Гумусовое состояние почв и плодородие// Почвоведение. – 2015.
16. Тугушева А.А., Трофимов С.Я. Биологическая активность почв в зависимости от содержания гумуса// Агрохимия. – 2018. - №4. –С. 17-23.

17. Sun R., et al. Soil restoration using organic amendments: impact on water-soluble organic matter and microbial functions// *Applied Soil Ecology*. – 2019. – Vol. 139. – P. 85–93.
18. Lehmann J., Kleber M. The contentious nature of soil organic matter// *Nature*. – 2015. – Vol. 528. – P. 60–68.
19. Щедрин В.Н., Докучаева Л.М., Юркова Р.Е. Гумусное состояние различных типов почв при длительном орошении// *Научн. журн. Рос. НИИ проблем мелиорации*. – 2017. – № 4(28). – С. 1–19.
20. Molnar D., et al. Effects of nitrogen rates on yield and quality of sugar beet// *Field Crops Research*. – 2019. – Vol. 235. – P. 66–74.
21. Ukalska-Jaruga A., Siebielec G., Siebielec S., Pecio M. The impact of exogenous organic matter on wheat growth and mineral nitrogen availability in soil// *Agronomy*. – 2020. – Vol. 10. – P. 13–14.
22. Fixen P.E., et al. Phosphorus: agri-food systems and global sustainability// *Plant and Soil*. – 2015. – Vol. 396. – P. 1–4.
23. Shen J., et al. Phosphorus dynamics: from soil to plant// *Plant Physiology*. – 2011. – Vol. 156, № 3. – P. 997–1005.
24. Zörb C., Senbayram M., Peiter E. Potassium in agriculture – status and perspectives// *Journal of Plant Physiology*. – 2014. – Vol. 171, № 9. – P. 656–669.
25. Römheld V., Kirkby E.A. Research on potassium in agriculture: needs and prospects// *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. – 2010. – Vol. 173, № 4. – P. 565–572.
26. Пигорев И.Я., Кондратова Е. Влияние микроудобрений на урожай и качество сахарной свёклы// *Инновационная деятельность в модернизации АПК*. – 2017. – С. 116–120.
27. Wimmer M.A., Eichert T. Mechanisms for boron deficiency-mediated changes in plant development// *Plant and Soil*. – 2013. – Vol. 371, № 1–2. – P. 31–52.
28. Азаренко Ю.А. Содержание и распределение бора в почвах и растениях геохимических сопряженных ландшафтов лесостепи Ишим-Иртышского междуречья// *Современные проблемы науки и образования*. – 2017. – № 4. – С. 10.
29. Alloway B.J. Zinc in soils and crop nutrition. – Brussels: International Zinc Association (IZA), 2008. – P. 13–18.

REFERENCES

1. United Nations. Population [Elektronnyy resurs]. - Rezhim dostupa: <https://www.un.org/ru/global-issues/population> - Data obrashcheniya: 25.06.2024.
2. Krause U., Koch H.-J., Maerlaender B. Soil properties effecting yield formation in sugar beet under ridge and flat cultivation// *European Journal of Agronomy*. – 2009. – Vol. 31, Issue 1. – P. 20–28.
3. Lebedeva M.P., Chizhikova N.P. Effect of fertilizers on agrochemical properties of soils and humus status// *Eurasian Soil Science*. – 2021. – Vol. 54, № 8. – P. 1041–1051.
4. Draycott A.P., Christenson D.R. Nutrient Management for Sugar Beet Production. – Wallingford: CABI Publishing, 2003. – P. 11–78.
5. Rekomendatsii po innovatsionnym tekhnologiyam proizvodstva i khraneniya sakharnoy svyokly v usloviyakh yugo-vostoka Kazakhstana. – Astana, 2024. – 25 s.
6. Hans B., Vermeulen G.D., Tijink F.G.J., Koch H.-J., Märlander B. Analysis of soil characteristics, soil management and sugar yield on top and averagely managed farms

- growing sugar beet (*Beta vulgaris* L.) in the Netherlands// *Soil and Tillage Research*. – 2011. – Vol. 117. – P. 61–68.
7. Sychev V.G., Shafran S.A. *Agrokhimicheskie svoystva pochv i effektivnost' mineral'nykh udobreniy*. – M.: VNIIA, 2013. – 296 s.
8. Il'yushenko I.V. *Otsenka vliyaniya agrokhimicheskikh svoystv chernozema obyknovennogo na effektivnost' mineral'nykh udobreniy pri vnesenii pod sakharnuyu svyoklu// Plodorodie*. – 2014. – № 4. – S. 6–7.
9. Shvyrkina S.V. *Vliyanie agrokhimicheskikh svoystv dernovo-podzolistykh i serykh lesnykh pochv na effektivnost' primeneniya mineral'nykh udobreniy pod kartofel': avtoref. dis. ... k.s.-kh.n.* – M.: VNIIA, 2014. – 25 s.
10. Kozeicheva E.S. *Vliyanie agrokhimicheskikh svoystv pochv Tsentral'nogo Nechernozem'ya na effektivnost' azotnykh udobreniy: avtoref. dis. .. k.b.n.* – M.: VNIIA, 2011. – 23 s.
11. Ivanova E.A., Kudeyarov V.N. *The role of organic matter in maintaining agrochemical soil properties// Eurasian Soil Science*. – 2023. – Vol. 56, № 3. – P. 354–363.
12. Shoba S.A., Khokhryakova O.N. *Long-term effects of different fertilizer systems on soil fertility and crop yields// Agronomy Research*. – 2021. – Vol. 19, № 3. – P. 1234–1245.
13. Arinushkina E.V. *Rukovodstvo po khimicheskomu analizu pochv*. – M.: MGU, 1962. – 491 s.
14. Aleksandrova L.N., Naydenova O.A. *Laboratorno-prakticheskie zanyatiya po pochvovedeniyu*. – L.: Agropromizdat, 1986. – 295 s.
15. Ermakov V.V. *Gumusovoe sostoyanie pochv i plodorodie// Pochvovedenie*. – 2015.
16. Tugusheva A.A., Trofimov S.Ya. *Biologicheskaya aktivnost' pochv v zavisimosti ot sodержaniya gumusa// Agrokimiya*. – 2018. - №4. – S.17-23.
17. Sun R., et al. *Soil restoration using organic amendments: impact on water-soluble organic matter and microbial functions// Applied Soil Ecology*. – 2019. – Vol. 139. – P. 85–93.
18. Lehmann J., Kleber M. *The contentious nature of soil organic matter// Nature*. – 2015. – Vol. 528. – P. 60–68.
19. Shchedrin V.N., Dokuchaeva L.M., Yurkova R.E. *Gumusnoe sostoyanie razlichnykh tipov pochv pri dlitel'nom oroshenii// Nauchn. zhurn. Ros. NII problem melioratsii*. – 2017. – № 4(28). – S. 1–19.
20. Molnar D., et al. *Effects of nitrogen rates on yield and quality of sugar beet// Field Crops Research*. – 2019. – Vol. 235. – P. 66–74.
21. Ukalska-Jaruga A., Siebielec G., Siebielec S., Pecio M. *The impact of exogenous organic matter on wheat growth and mineral nitrogen availability in soil// Agronomy*. – 2020. – Vol. 10. – P. 13–14.
22. Fixen P.E., et al. *Phosphorus: agri-food systems and global sustainability// Plant and Soil*. – 2015. – Vol. 396. – P. 1–4.
23. Shen J., et al. *Phosphorus dynamics: from soil to plant// Plant Physiology*. – 2011. – Vol. 156, No. 3. – P. 997–1005.
24. Zörb C., Senbayram M., Peiter E. *Potassium in agriculture – status and perspectives// Journal of Plant Physiology*. – 2014. – Vol. 171, No. 9. – P. 656–669.
25. Römheld V., Kirkby E.A. *Research on potassium in agriculture: needs and prospects// Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. – 2010. – Vol. 173, №4. – P.565–572.

26. Pigorev I.Ya., Kondratova E. Vliyanie mikroudobreniy na urozhay i kachestvo sakharnoy svyokly// Innovatsionnaya deyatel'nost' v modernizatsii APK. – 2017. – S. 116–120.

27. Wimmer M.A., Eichert T. Mechanisms for boron deficiency-mediated changes in plant development// Plant and Soil. – 2013. – Vol. 371, № 1–2. – P. 31–52.

28. Azarenko Yu.A. Soderzhanie i raspredelenie bora v pochvakh i rasteniyakh geokhimicheskikh sopryazhennykh landshaftov lesostepi Ishim-Irtyshskogo mezhdurech'ya// Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya. – 2017. – № 4. – S. 10.

29. Alloway B.J. Zinc in soils and crop nutrition. – Brussels: International Zinc Association (IZA), 2008. – P. 13–18.

ТҮЙІН

Р.Х. Рамазанова¹, Қ.К. Мұсаева^{1*}, Н.С. Әсімжанов¹, З.А. Зәріп¹, А.К. Абай¹
ЖАМБЫЛ ОБЛЫСЫНЫҢ ЖАҒДАЙЫНДА ҚАНТ ҚЫЗЫЛШАСЫН ӨСІРУ КЕЗІНДЕ
БИОСТИМУЛЯТОРЛАР МЕН МИКРОТЫҢАЙТҚЫШТАРДЫ ҚОЛДАНУДЫҢ АШЫҚ СҰР
ТОПЫРАҚТЫҢ АГРОХИМИЯЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІНЕ ӘСЕРІ

¹Ө.О. Оспанов атындағы Қазақ топырақтану және агрохимия ғылыми-зерттеу институты, 050060, Алматы, Әл-Фараби даңғылы, 75 В, Қазақстан,

*e-mail: mkuralai_97@mail.ru

Бұл жұмыста Жамбыл облысының ашық сұр топырақтарында жүргізілген зерттеулердің нәтижелері келтірілген, онда қант қызылшасына негізгі минералдық қоректену аясында биостимуляторлар мен микротыңайтқыштарды жапырақ арқылы енгізу кезінде топырақтың агрохимиялық қасиеттерінің өзгеруі қарастырылды. Өсімдіктерді жапырақ арқылы *Amino Turbo*, *Acadian goldstar*, *Everbest Amino* биостимуляторларымен және *Boromol*, *Nitrogeno*, *Terra Organico* микротыңайтқыштарымен өсудің әртүрлі фазаларында өңдеудің топырақтың агрохимиялық көрсеткіштеріне жанама әсері анықталды. Оларды қолдану суға еритін көміртек үлесін арттыруға ықпал ететіні көрсетілді. Қосымша жапырақ арқылы қоректендіру өсімдіктердің вегетация кезеңінде қоректік элементтердің максималды сіңірілуіне дейін азот пен фосфордың қолжетімді түрлерінің, сондай-ақ калийдің мөлшерін арттыруға мүмкіндік берді, бұл тамыржемістердің қосымша өнімін қамтамасыз етеді. Микроэлементтердің фазалық сезімталдығы байқалды: борды бір рет фондық енгізу жеткілікті, ал мырыш екі рет қолдануды қажет етеді. Ұсынылған схема – себу алдында НРК-фоны; 2–3 және 6–8 жапырақ фазасында *Amino turbo* және *Boromol*; қатар жапырақтану кезінде *Nitrogeno* және *Terra organico* – қоректік заттардың біркелкі түсуі мен сақталуын қамтамасыз етеді. Алынған деректер қант қызылшасын ашық сұр топырақтарда өсіру кезінде биостимуляторлар мен микротыңайтқыштарды қолданудың кешенді жапырақ қоректендіру схемасын енгізудің мақсатқа сай екенін растайды.

Түйінді сөздер: сұр топырақ, агрохимиялық көрсеткіштер, гумус, тыңайтқыш, минералдық қоректену, қоректік элементтер, қант қызылшасы.

SUMMARY

R.Kh. Ramazanova¹, K.K. Mussayeva^{1*}, N.S. Asimzhanov¹, Z.A. Zarip¹, A.K. Abay¹
AGROCHEMICAL PROPERTIES OF LIGHT SIEROZEM UNDER THE APPLICATION OF
BIOSTIMULANTS AND MICRONUTRIENTS DURING SUGAR BEET
CULTIVATION IN THE CONDITIONS OF ZHAMBYL REGION

¹*Kazakh Research Institute of Soil Science and Agrochemistry named after
U.U. Usпанov, 050060, Almaty, Al-Farabi Ave., 75 B, Kazakhstan,
e-mail: mkuralai_97@mail.ru

This study presents the results of research conducted on light sierozem soils of the Zhambyl region, focusing on changes in the agrochemical properties of the soil when applying foliar feeding of sugar beet plants with biostimulants and micronutrients against the background of basic mineral nutrition. An indirect effect of foliar treatment with the biostimulants Amino Turbo, Acadian goldstar, Everbest Amino and the micronutrients Boromol, Nitrogeno, and Terra Organico, applied at various growth stages, on the agrochemical indicators of the soil was identified. It was shown that their use increases the proportion of water-soluble carbon. Additional foliar feeding with biostimulants and micronutrients contributed to an increase in the content of available forms of nitrogen and phosphorus up to the maximum nutrient uptake, and potassium during the vegetation period, which ensures an additional yield of root crops. Micronutrients showed phase sensitivity: boron is sufficient to apply once as a background treatment, while zinc requires two applications. The proposed scheme – NPK background before sowing; Amino Turbo and Boromol at the 2–3 and 6–8 leaf stages; Nitrogeno and Terra Organico at row closure – ensures uniform supply and retention of nutrients. The obtained data confirm the feasibility of applying a comprehensive foliar feeding scheme using biostimulants and micronutrients when cultivating sugar beet on light sierozem soils.

Keywords: sierozem, agrochemical indicators, humus, fertilizer, mineral nutrition, nutrients, sugar beet.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

1. Рамазанова Раушан Хамзаевна - Председатель Правления, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2059-709X>, e-mail: raushasoil88@mail.ru

2. Мусаева Куралай Кенжебайкызы - старший инженер-почвовед отдела мелиорации засоленных почв, магистр сельскохозяйственных наук, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7348-1720>, e-mail: mkuralai_97@mail.ru

3. Асимжанов Нурбол Сакенулы- старший инженер-почвовед отдела мелиорации засоленных почв, магистр сельскохозяйственных наук, ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0006-2494-5895>, e-mail: asimzhanov.nurbol@mail.ru

4. Зарип Закир Асылбекулы- старший инженер-почвовед отдела мелиорации засоленных почв, магистр сельскохозяйственных наук, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0180-5359>, e-mail: zakir0802@mail.ru

5. Абай Аян Кумисбекулы - младший научный сотрудник отдела плодородия и биологии почв, магистр сельскохозяйственных наук, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9470-9229>, e-mail: rjaad@mail.ru

ОБЗОРНАЯ СТАТЬЯ

ГРНТИ 68.05.45

DOI: 10.51886/1999-740X_2025_4_64

А.К. Аманбосын¹, А.А. Курманбаев¹

РОЛЬ БИОЦЕМЕНТАЦИИ В РЕШЕНИИ ПРОБЛЕМ СТАБИЛИЗАЦИИ ПОЧВ И СЕКВЕСТРАЦИИ УГЛЕРОДА

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

Аннотация. Микробиологическое осаждение карбонатов (МОК) представляет собой экологически чистую и перспективную технологию для укрепления грунтов, основанную на активности микроорганизмов, таких как *Sporosarcina pasteurii*, которые способствуют осаждению карбонатов кальция. Этот процесс включает биологическое взаимодействие бактерий с химическими веществами, такими как мочевины и ионы кальция, что приводит к образованию кальцитовых отложений, которые укрепляют структуру грунта, повышая ее прочность, снижая проницаемость и увеличивая устойчивость к эрозии. В статье рассматриваются виды и механизмы биоцементации, а также ключевые факторы, влияющие на эффективность МОК, включая выбор микроорганизмов, условия среды и состав грунта. Описываются методы оптимизации биоцементации для достижения максимальной эффективности, а также рассматриваются различные области применения технологии, такие как улучшение песчаных и слабых глинистых грунтов. Особое внимание уделяется экологическим аспектам, в частности, применению МОК для секвестрации углерода, что способствует долговременному захоронению углерода в почвах и помогает в борьбе с изменением климата. В заключение обсуждаются перспективы дальнейших исследований и возможные направления для расширения применения этой технологии в строительстве и геотехнике.

Ключевые слова: микробиологическое осаждение карбонатов, биоцементация, улавливание и хранение углерода, мочевины, карбонат кальция.

ВВЕДЕНИЕ

В начале 2000-х годов калифорнийские ученые под руководством J.T. DeJong [1] успешно применили способность бактерий *Bacillus pasteurii* к формированию биопленки на частицах грунта, в питательной среде из кальция и мочевины для цементирования грунта за счет заполнения пустот между зёрен минерального материала кальцитом. В 2017 году впервые в Казахстане научные исследования в этой области были начаты А. Курманбаевым и его коллегами, что стало важным вкладом в развитие микробной геотехнологии в стране [2].

Во многих частях мира грунт с плохими инженерными свойствами не пригоден для использования, в первую очередь из-за его нестабильной струк-

туры и низкой механической прочностью. При определенных факторах окружающей среды (сейсмическая активность, цикл заморозания-оттаивания, чередование температур, ливни и наводнения и т.д.) такой грунт может вызвать ряд геотехнических инженерных проблем [3].

Традиционно укрепление грунта осуществляется с помощью механических методов (таких как уплотнение, предварительная нагрузка, вибрация, смачивание, дренаж и др.) или с применением химических и синтетических добавок (например, цемента, извести, летучей золы, промышленных отходов, органических веществ, геосинтетических материалов и др.). Хотя такие методы считаются эффективными, их всё чаще критикуют за дороговизну, высо-

кий расход энергии и вред экологии – они выделяют вредные вещества и углекислый газ. Поэтому сейчас важно разрабатывать новые способы укрепления почв, которые будут не только надёжными, но и дешевыми, безопасными для природы и не потребляющими много энергии [4].

Микробная геотехнология – это новая ветвь геотехнической инженерии. Несмотря на существование различных потенциальных применений микроорганизмов в геотехнической инженерии, в настоящее время перспективные применения сосредоточены преимущественно на биоцементации [5].

Микробно-индуцированное карбонатное осаждение (МОК, в английской версии MICP), является перспективной технологией, применяемой в экологическом строительстве, особенно в борьбе с опустыниванием. Опустынивание – это процесс деградации земель, происходящий в засушливых, полусухих и субгумидных районах под воздействием различных факторов, включая климатические условия и человеческий фактор. Глобальная проблема опустынивания обусловлена как природными, так и антропогенными факторами, такими как изменение климата, ветровая и водная эрозия почвы, стремление к экономической выгоде, уничтожение растительности и нерациональное использование водных ресурсов. Все эти факторы способствуют дальнейшему развитию опустынивания. Поскольку последствия этого явления негативно сказываются на окружающей среде и экономике, контроль над процессом опустынивания имеет критическое значение. Эоловая эрозия – это один из ключевых процессов, воздействующих на пустынные экосистемы по всему миру, делая их уязвимыми к деградации. Большинство пустынь подвержены риску эрозии, особенно в районах с засушливым климатом [4]. Около 12% этих земель подвержены

деградации, что составляет примерно 5 миллионов квадратных километров. Почвы в таких регионах зачастую состоят из рыхлого песка и ила, которые легко поддаются воздействию высокоскоростных ветров, что приводит к поверхностной эрозии [6].

В связи с этим МОК представляет собой особенно перспективный метод для борьбы с опустыниванием за счёт стабилизации рыхлых песчаных почв и предотвращения эоловой эрозии. Её основа – способность микроорганизмов инициировать образование кальцита, который, оседая между частицами грунта, скрепляет их и улучшает механические свойства почвы. Это снижает её уязвимость к ветровой эрозии и повышает устойчивость к внешним воздействиям. Учитывая, что данный подход может быть реализован непосредственно на месте (*in situ*) с минимальными затратами и вмешательством в природную среду, он становится привлекательной альтернативой традиционным способам укрепления почв. Кроме того, как показывают исследования, биоцементация эффективна в различных климатических условиях и на разнообразных типах грунтов, что делает её универсальным инструментом в области устойчивого природопользования и экологического строительства. Таким образом, применение данной технологии открывает новые горизонты в борьбе с деградацией земель и восстановлении экосистем, особенно в уязвимых засушливых и полузасушливых регионах [7].

Микробно-индуцированное осаждение карбонатов.

В последние годы микробиологическое упрочнение грунтов (на основе микробно-индуцированного осаждения карбонатов) привлекло значительное внимание как экологически чистый и эффективный способ повышения инженерных характеристик почвы. В его основе лежит способность микроорга-

низмов, особенно уреазы продуцирующих бактерий, катализировать гидролиз мочевины, что приводит к образованию карбоната кальция (CaCO_3), оседающего между частицами грунта. Образующиеся кристаллы действуют как природный цемент, укрепляя структуру за счёт увеличения сцепления и трения между частицами, а также благодаря снижению проницаемости и повышению устойчивости к эрозионным процессам [8]. В отличие от традиционных методов армирования, данный биотехнологический подход требует минимального вмешательства в окружающую среду. Использование растворов с низкой вязкостью и небольших инъекционных отверстий позволяет легко проникать в пористую структуру почвы, обеспечивая равномерную и глубокую минерализацию [9]. Это делает метод особенно подходящим для задач стабилизации грунтов, защиты от эрозии, герметизации пустот и трещин, а также для долговременного повышения прочности и устойчивости различных инженерных сооружений [10]. Кроме того, благодаря междисциплинарному характеру, объединяющему микробиологию, геохимию и геотехнику, технология рассматривается как перспективное направление в экологически устойчивом строительстве. Современные исследования подтверждают её успешную реализацию в реальных условиях, одновременно подчёркивая необходимость дальнейшего изучения влияния биологических и абиотических факторов, оптимизации процедур обработки и разработки подходов к масштабированию для широкого инженерного использования [11]. Биогеохимический механизм микробно-индуцированного осаждения карбоната кальция основан на специфических метаболических путях определённых микроорганизмов, способных инициировать образование карбонатных соединений, преимущественно CaCO_3 .

Ключевым отличием данного процесса от природных геохимических циклов является участие бактериальных ферментов, значительно ускоряющих реакции и повышающих их эффективность. Существует несколько метаболических механизмов, посредством которых микроорганизмы стимулируют карбонатную минерализацию:

Уреолиз. Наиболее изученным механизмом МОК является уреолиз, при котором бактерии, обладающие уреазной активностью (например, *Sporosarcina pasteurii*, *Bacillus megaterium*), катализируют гидролиз мочевины ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$) с образованием аммиака (NH_3) и карбоната. Карбамат, промежуточный продукт, спонтанно гидролизуетсся с образованием дополнительного количества аммиака и угольной кислоты. Важным участником этого процесса является также карбоангидраза – фермент, способствующий преобразованию угольной кислоты в бикарбонат, что повышает концентрацию ионов CO_3^{2-} в среде [12]. Повышение pH, вызванное уреолизом, способствует ускоренному осаждению CaCO_3 при наличии ионов кальция (Ca^{2+}).

Восстановление сульфатов. Некоторые бактерии, например *Desulfovibrio desulfuricans*, способны восстанавливать сульфаты (SO_4^{2-}) до сульфидов (S^{2-}) в анаэробных условиях. Этот процесс, известный как диссимиляторное восстановление сульфатов, также увеличивает щелочность среды, создавая благоприятные условия для осаждения карбонатов [13]. Полученные сульфиды могут взаимодействовать с ионами металлов, включая кальций, с образованием устойчивых осадков.

Восстановление железа. При участии бактерий, таких как *Geobacter sulfurreducens*, трёхвалентное железо (Fe^{3+}) восстанавливается до двухвалентного (Fe^{2+}), что сопровождается увеличением pH и последующим осаждением карбоната кальция. Этот путь

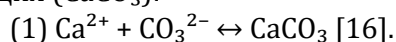
особенно значим в средах с высоким содержанием железа.

Денитрификация. Процесс денитрификации осуществляется такими микроорганизмами, как *Pseudomonas denitrificans*, *Alcaligenes*, *Denitrobacillus*, *Thiobacillus*, *Spirillum* и *Micrococcus*. Эти факультативно анаэробные бактерии восстанавливают нитраты (NO_3^-) до молекулярного азота (N_2), при этом поглощаются протоны, что способствует повышению pH и формированию условий для осаждения карбонатов [14].

В отличие от естественных геохимических процессов, МОК происходит гораздо быстрее благодаря участию ферментов, способствующих повышению щёлочности среды и концентрации карбонат-ионов. Такая скорость и возможность контролировать параметры делают технологию крайне перспективной для биоремедиации, стабилизации грунтов, снижения риска разжижения, ремонта бетона и даже связывания углерода [15].

Механизм минерализации МОК.

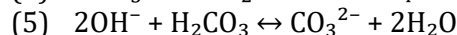
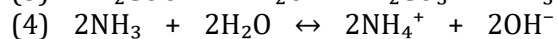
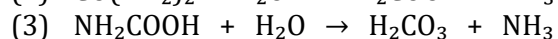
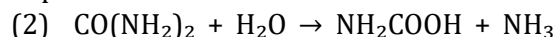
Микробиологическое осаждение карбонатов – это процесс, при котором микроорганизмы, используя различные метаболические пути, способствуют образованию карбонат-ионов (CO_3^{2-}), которые в присутствии ионов кальция (Ca^{2+}) осаждаются в виде карбоната кальция (CaCO_3):



Если осаждение происходит в порах между минеральными частицами, они могут соединяться между собой, образуя прочную цементирующую структуру. МОК может осуществляться как за счёт автотрофных, так и гетеротрофных метаболических путей [17]. Среди всех механизмов уреолитического путь является наиболее широко применяемым из-за простоты культивирования бактерий, устойчивости в слож-

ных питательных средах и легкости контроля метаболизма [18].

Биохимические реакции уреолитического пути: Во время уреолитического МОК одна молекула мочевины гидролизуется внутриклеточно ферментом уреазой с образованием одной молекулы аммиака и одной молекулы карбаминовой кислоты:



Повышение pH в микроокружении клеток происходит за счёт выхода аммиака и образования гидроксид-ионов, что сдвигает равновесие угольной кислоты в сторону образования карбонат-ионов. Это создаёт условия, благоприятные для осаждения CaCO_3 [19].

Как показано на рисунке 1а, эти процессы можно обобщить следующим образом: сначала бактерии выделяют уреазу, затем происходит гидролиз мочевины с образованием аммиака и карбоната, сопровождающийся увеличением pH, что способствует осаждению карбоната кальция в кальцийсодержащей среде [20].

В результате образуется осадок CaCO_3 , который может связывать частицы породы, улучшая механические свойства грунта.

Факторы оптимизации биоцементации.

Для повышения эффективности метода микробно-индуцированного осаждения карбонатов в стабилизации грунтов и улучшении их инженерных характеристик необходимо учитывать ряд ключевых факторов. Эти параметры критичны для формирования прочной, стабильной и равномерной цементирующей матрицы. Ниже представлены основные из них.

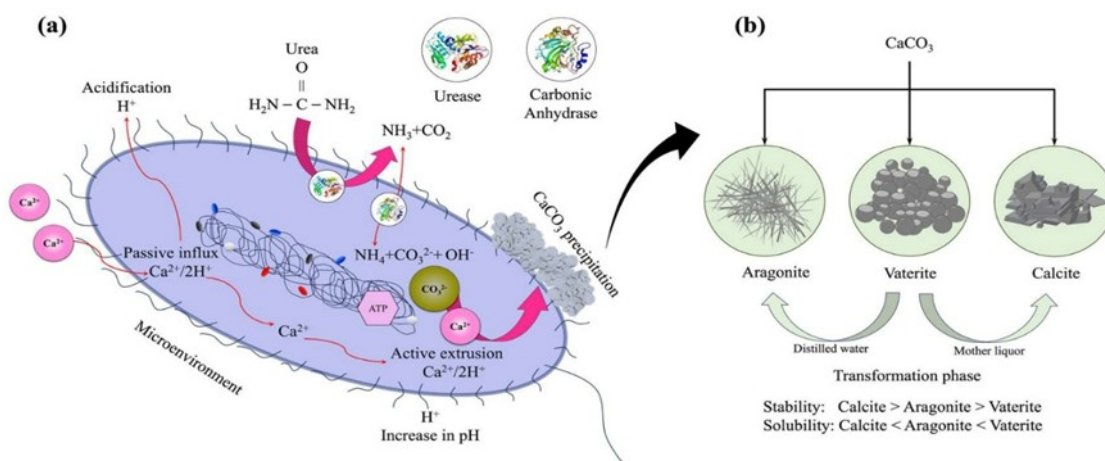


Рисунок 1 – Схематическое изображение:

- (a) процесса МОК (микробиологическое осаждение карбонатов),
 (b) трёх форм полиморфов CaCO_3 (карбоната кальция) [21]

Влияние бактериальных штаммов и концентрации бактерий на процесс МОК.

Выбор бактериального штамма является ключевым фактором, определяющим успешность процесса биоцементации. Бактерии играют важную роль в расщеплении мочевины и других органических соединений, высвобождая ионы углекислоты (CO_3^{2-} и HCO_3^-), которые, взаимодействуя с кальцием, образуют карбонат кальция (CaCO_3), цементирующий частицы почвы. Концентрация бактерий также имеет важное значение, влияя на насыщение CO_3^{2-} и параметры роста кристаллов как на микро-, так и на макроуровне, что, в свою очередь, определяет прочностные характеристики и геометрию образующихся минералов.

Бактериальные штаммы: для эффективного осаждения карбонатов часто используют штаммы с высокой уреазной активностью, такие как *Sporosarcina pasteurii*, *Bacillus* spp., *Spodoptera* spp. Эти бактерии обладают способностью эффективно расщеплять мочевины, выделяя аммиак и углекислый газ, что способствует созданию щелочной среды, необходимой для образования

карбоната кальция. Например, S. Jain и её коллеги [22] применили *Sporosarcina pasteurii* и изолированные виды *Proteus* в концентрациях от 1×10^6 до 1×10^8 клеток/мл, наблюдая увеличение кластеров кристаллов карбоната кальция и повышение прочности и проницаемости песка. Аналогично, Лю и др. использовали *Bacillus pasteurii* в глиняных колоннах, что привело к увеличению толщины образца и снижению водопоглощения при повышении концентрации бактерий [23].

Зависимость от условий среды: эффективность бактерий значительно зависит от условий окружающей среды, таких как pH, температура, концентрация кислорода и солей. Например, *Sporosarcina pasteurii* наиболее эффективно работает в нейтральной или слегка щелочной среде (pH 7–9) и при температуре около 30°C . Эти условия оптимальны для расщепления мочевины и формирования стабильных карбонатных кристаллов [24].

Как показывают исследования, повышение концентрации бактерий приводит к ускорению разложения мочевины и интенсификации осаждения карбоната кальция, что увеличи-

вает количество зон минерализации. Dong Z. H. и др. установили, что увеличение оптической плотности культур *Bacillus pasteurii* положительно коррелирует с ростом предела прочности при одноосном сжатии (ПРОС) [25]. При низких концентрациях бактерий образуются более крупные кристаллы карбоната кальция, которые могут трансформироваться из ватерита в кальцит, что влияет на тип и геометрию минеральных образований [26].

Влияние концентрации цементирующего раствора и источников кальция на процесс МОК.

Использование уреазы-гидролизующих бактерий для МОК требует мочевины и солей кальция, образующих цементирующий раствор. Концентрация этого раствора и источник кальция критически влияют на выход карбоната кальция, распределение размеров кристаллов, активность уреазы и механические свойства почвы. Уреаза катализирует разложение мочевины, образуя аммиак и повышая pH. Однако высокая щелочность может денатурировать белки уреазы, в то время как чрезмерные концентрации Ca^{2+} препятствуют транспортировке сырья и активности уреазы [27]. Таким образом, оптимизация концентрации цементирующего раствора имеет важное значение для эффективной минерализации и экономической эффективности.

Правильный выбор концентрации цементирующего раствора (содержащего кальций и углерод) оказывает значительное влияние на скорость осаждения карбоната кальция и прочность образующейся структуры. Раствор обычно содержит источники кальция (например, CaCl_2 , $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$) и углерода (например, мочевина или NaHCO_3). Источник кальция снабжает почву ионами кальция, которые в сочетании с углеродными ионами образуют карбонат кальция. Однако концентрация этих компонентов должна быть

оптимальной, чтобы избежать токсичности для бактерий или недостаточной осадочной активности.

Согласно проведенным исследованиям, хлорид и нитрат кальция значительно способствуют улучшению цементации песчаных грунтов, тогда как ацетат кальция демонстрирует меньшую эффективность [28]. Для достижения оптимальных результатов в процессе биоцементации важно подобрать подходящую концентрацию цементирующего раствора. Установлено, что раствор с концентрацией 0,5 моль/л обеспечивает наилучший эффект, увеличивая содержание карбоната кальция на 2,78% и повышая прочность на одноосное сжатие (ПРОС) до 2,436 МПа. Хотя при концентрации 2,5 моль/л наблюдается максимальное образование CaCO_3 и усиление сцепления между частицами почвы, чрезмерно высокая концентрация ингибирует уреазную активность, что снижает скорость минерализации. Переизбыток мочевины вызывает резкое повышение pH, подавляющее бактериальную активность, а также увеличивает осмотическое давление, нарушая транспорт питательных веществ и провоцируя стрессовые реакции у микроорганизмов [26].

Таким образом, слишком низкие концентрации компонентов замедляют процесс осаждения карбоната кальция и не обеспечивают должного укрепления почвы, в то время как чрезмерные концентрации могут быть токсичными для бактерий, что снижает эффективность биоцементации. Обычно оптимальные концентрации компонентов (например, 0,5 М) обеспечивают хорошее соотношение между активностью бактерий и количеством осаждаемого карбоната кальция, улучшая прочностные характеристики почвы [29].

Кроме того, высокая концентрация раствора способствует образованию более прочных цементирующих связей, улучшая механические свойства

материала и снижая его проницаемость для воды, что играет ключевую роль в стабилизации грунта и его улучшении для применения в строительных и инженерных проектах [30]. В целом, хотя методы МОК демонстрируют различные оптимальные концентрации цементирующего раствора, выбор подходящей концентрации имеет решающее значение для улучшения механических свойств и стабильности почвы. Будущие исследования должны изучить оптимальные концентрации и биохимическую кинетику в различных условиях для улучшения практических приложений.

Инкубационный период.

Инкубация необходима для обеспечения роста бактерий и активного участия микробов в процессе осаждения карбоната кальция.

Длительность инкубации: оптимальное время инкубации зависит от конкретного штамма бактерий, условий среды и физических характеристик почвы. В общем, инкубационный период может варьироваться от 14 до 28 дней. Чем дольше бактерии имеют возможность размножиться и осадить карбонат кальция, тем прочнее и стабильнее становится почвенная структура [31].

Роль инкубационного периода: во время инкубации бактерии продолжают расщеплять мочевину, выделяя углекислый газ, который способствует образованию карбоната кальция. Бактерии также начинают активно взаимодействовать с частицами почвы, улучшая их сцепление и стабилизируя грунт [32].

Влияние температуры на процесс МОК и осаждение карбоната кальция.

Технология МОК включает в себя быстрый процесс сопряжения биохимических реакций и бактериального метаболизма в пористой среде. Колебания температуры существенно влияют на процесс микробиологической цементации грунтов через различные

механизмы, включая динамику роста бактерий, скорость метаболических реакций и активность уреазы [33]. Эти параметры напрямую воздействуют на скорость образования, выход, размер и морфологию кристаллов карбоната кальция, что, в свою очередь, обуславливает различия в эффективности обработки почвы данным биотехнологическим методом.

Широко признано, что активность уреазы обычно увеличивается при температурах от 0 до 30°C [34]. Например, *Sporosarcina pasteurii*, распространенная бактерия в процессе МОК, показывает пиковую активность при 30 °C. Практические приложения должны учитывать комплексное влияние температуры на жизнеспособность бактерий. Низкие температуры (4°C) препятствуют росту и прикреплению бактерий, снижая осаждение карбоната кальция, тогда как высокие температуры (50°C) быстро снижают активность уреазы. Несмотря на температурные проблемы, повторные инъекции бактерий поддерживают значительную эффективность цементации.

Исследования кристаллизации показывают преобладание ватерита при 4°C и кальцита при 50°C [35]. Почва, обработанная МОК, показала самый высокий ПРОС при 25°C, несмотря на равные количества карбоната кальция. Это несоответствие объясняется влиянием температуры на размер кристаллов и кинетику связывания. При 50°C более мелкие кристаллы (2–5 мкм) действуют как защитные слои вокруг частиц почвы, препятствуя цементации между частицами. Напротив, более крупные кристаллы (15–20 мкм) при температуре 25°C заполняют пустоты и образуют прочные связи, улучшая механические свойства почвы [36].

Температура также оказывает значительное влияние на растворимость кальциевых солей и диффузию реаген-

тов, что влияет на процесс осаждения карбоната кальция. Например, высокие температуры могут увеличить растворимость карбонатов, что ускоряет образование стабильных кристаллов и влияет на скорость осаждения. Температура регулирует активность уреазы – фермента, который расщепляет мочевины, а также влияет на скорость осаждения карбонатов. При температуре около 30°C активность уреазы максимальна, что способствует интенсивному осаждению карбоната кальция. Однако при температурах выше 40°C активность бактерий может значительно снизиться.

Таким образом, температура играет ключевую роль в процессе МОК, регулируя как метаболизм бактерий, так и растворимость карбонатов, что в свою очередь влияет на конечный результат осаждения карбоната кальция и механические свойства обработанных почв [34].

Тип почвы.

Тип почвы и её физико-химические характеристики имеют решающее значение для эффективности процесса биоцементации.

Размер частиц: МОК наиболее эффективен в песчаных и супесчаных почвах, так как их крупные частицы обеспечивают более хорошее проникновение раствора и активное взаимодействие с бактериями. Почвы с более мелкими частицами, такие как глинистые почвы, могут требовать дополнительных методов обработки, таких как добавление песка для улучшения проницаемости [35].

Гидравлическая проводимость: почвы с высокой гидравлической проводимостью обеспечивают более равномерное распределение раствора, что способствует лучшему осаждению карбоната кальция. В глинистых и сильно уплотнённых почвах может потребоваться предварительная подготовка или добавление инертных

материалов для повышения проницаемости [37].

Органические вещества: наличие органических веществ в почве может воздействовать на активность бактерий и процесс цементирования. В некоторых случаях органические вещества могут препятствовать процессу осаждения карбоната кальция, снижая эффективность биоцементации [38].

Процесс микробно-индуцированного осаждения карбоната кальция инициируется путем введения в целевую среду специализированных микробных культур, которые взаимодействуют с растворами, содержащими ионы кальция (Ca^{2+}) и источники карбонат-ионов (CO_3^{2-}). Эти микроорганизмы, в том числе *Sporosarcina pasteurii*, *Bacillus megaterium* и *Lysinibacillus fusiformis*, благодаря уреазной активности метаболизируют соединения углерода, продуцируя карбонат кальция в виде осадка. Обычно процесс развивается в течение 1–5 суток и приводит к накоплению прочных карбонатных структур, что способствует укреплению почвы и связыванию углерода [39].

Роль мочевины и путь к углеродно-нейтральному МОК.

Ключевым элементом уреолитического метаболического пути в технологии микробиологического упрочнения грунтов является мочевина, однако вопрос о её экологически устойчивом происхождении остаётся нерешённым. В настоящее время этот компонент в основном синтезируется из аммиака (производимого из природного газа) и углекислого газа – процесс, сопряжённый с существенными выбросами парниковых газов. Это ставит под сомнение экологическую целесообразность традиционного подхода к биоцементации в условиях глобальной борьбы с климатическими изменениями. Современные научные работы предлагают интегрировать в производство мочевины технологии улавливания и длительного

хранения CO₂. Одним из перспективных направлений является применение прямого извлечения углекислого газа из атмосферы, что позволяет создать замкнутый цикл: тот же CO₂, который извлекается из воздуха, используется как сырьё для получения мочевины, применяемой в почвенном упрочнении [40]. Другой подход заключается в синтезе так называемой «зелёной» мочевины – посредством прямой химической реакции между захваченными CO₂ и азотом (N₂) из дымовых газов, что позволяет существенно снизить выбросы в процессе производства. Дополнительно, технология «зелёного» аммиака, основанная на использовании возобновляемых источников энергии, может служить фундаментом для создания устойчивой системы получения мочевины. Одним из наиболее простых и потенциально эффективных решений также является разработка биореакторов, способных поглощать атмосферный CO₂ с последующим использованием полученного сырья в биоцементации. При этом взаимодействие уреазных бактерий с углекислым газом в контролируемых условиях не только укрепляет почвенные структуры, но и способствует активному биозахвату углерода, что делает данный метод важным вкладом в достижение целей по углеродной нейтральности [41].

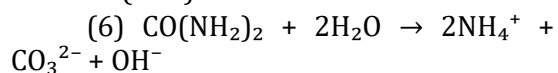
Оценка эффективности улавливания CO₂ в процессе МОК.

Хотя уреолитический механизм микробиологической цементации не предусматривает прямого улавливания атмосферного CO₂, данный процесс тем не менее способствует его секвестрации за счёт образования устойчивых карбонатных соединений. Углерод фиксируется в осадочных формах, преимущественно в виде карбоната кальция (CaCO₃), в результате биохимических реакций, инициируемых метаболической активностью уреазных микроор-

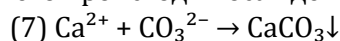
ганизмов. Благодаря этому биотехнология может рассматриваться как эффективный инструмент непрямого захвата углерода, способствующий реализации стратегии углеродной нейтральности.

Процесс можно условно разделить на две последовательные стадии:

Гидролиз мочевины: Уреаза, продуцируемая бактериями (например, *Sporosarcina pasteurii*), катализирует реакцию гидролиза мочевины, в результате которой образуются ионы аммония (NH₄⁺), карбонат-анионы (CO₃²⁻) и гидроксид-анионы (OH⁻):



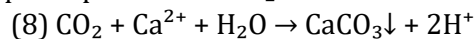
Осаждение карбоната кальция: Образовавшиеся ионы CO₃²⁻ взаимодействуют с ионами кальция (Ca²⁺), присутствующими в растворе, в результате чего происходит осаждение CaCO₃:



На этом этапе происходит минеральная фиксация углерода в устойчивой форме, что и рассматривается как ключевой механизм секвестрации CO₂ в технологии МОК [42].

Стехиометрическая оценка улавливания CO₂.

Для количественной оценки потенциала улавливания углекислого газа можно использовать упрощённый стехиометрический подход, основанный на эквивалентности между количеством осадённого CaCO₃ и количеством зафиксированного CO₂:



Согласно данной реакции, один моль CO₂ (молярная масса 44,01 г/моль) участвует в образовании одного моля CaCO₃ (молярная масса ~100,09 г/моль). Это означает, что на каждый моль осадённого карбоната кальция МСР фиксирует 44,01 г CO₂.

Таким образом, можно сделать вывод: Процесс МОК улавливает примерно 44 грамма CO₂ на каждый моль образовавшегося CaCO₃.

Этот показатель может быть использован как основа для дальнейших расчётов при масштабировании технологии, например, в инженерных проектах по стабилизации грунтов или в системах биоцементации, ориентированных на снижение углеродного следа [41].

Практическое значение.

Хотя в химических уравнениях уреолиза участие атмосферного CO_2 не очевидно, реальная секвестрация углерода происходит за счёт утилизации углерода, ранее введённого в систему в виде мочевины или CO_2 , полученного через устойчивые источники, включая улавливание выбросов или прямое извлечение из атмосферы. В совокупности с инновациями в производстве «зелёной мочевины», описанными выше, это делает технологию МОК мощным инструментом в арсенале устойчивого строительства и биогеохимического управления углеродом.

Преимущества технологии МОК в контексте улавливания и хранения углерода.

Технология МОК демонстрирует значительные преимущества в качестве метода улавливания и долгосрочного хранения углекислого газа. В отличие от традиционных промышленных подходов, она опирается на естественные биогеохимические процессы, не требующие высоких энергозатрат или масштабной инфраструктуры. Это делает методику не только экономически целесообразной, но и экологически устойчивой альтернативой [43].

Одним из ключевых достоинств микробиологической цементации грунтов является широкое распространение задействованных микроорганизмов – в первую очередь уреазы продуцирующих бактерий – в природной среде, что существенно снижает потребность в их лабораторном культивировании. Процесс минерализации протекает при умеренных температурах и в условиях низкого энергопотребления, в резуль-

тате чего углерод связывается в виде стабильного соединения – карбоната кальция (CaCO_3).

Образующиеся в ходе МОК карбонатные отложения обладают высокой стабильностью и способны сохранять зафиксированный углерод на протяжении геологических временных масштабов. Это подтверждается существованием природных аналогов – таких как известняк, доломит и меловые породы, служащих естественными хранилищами углерода миллионы лет. Таким образом, технология микробной минерализации CO_2 рассматривается как перспективное направление минеральной секвестрации, способствующее его долговременному исключению из глобального углеродного цикла [44].

Применение в строительстве и геотехнической инженерии.

Благодаря универсальности, технология МОК может быть адаптирована в различных инженерных и промышленных секторах. В геотехнической инженерии она применяется для укрепления слабых грунтов, повышения несущей способности оснований, а также для стабилизации откосов и склонов [24]. Инъекция бактериальных растворов в грунт способствует осадению карбонатов в порах, образуя цементоподобные соединения, повышающие прочность и стабильность конструкций.

В строительстве МОК может использоваться для создания биоцемента, где микроорганизмы, внесённые в бетонную смесь, способствуют улавливанию CO_2 во время твердения. Этот зафиксированный углерод остаётся в структуре материала на протяжении всего срока службы объекта. Такой подход может существенно снизить углеродный след строительной отрасли, особенно в контексте замены традиционного портландцемента, производство которого сопровождается значительными выбросами CO_2 [44].

МОК как средство повышения герметичности геологических формаций.

В контексте геологической секвестрации углерода микробиологическая технология упрочнения грунтов демонстрирует высокий потенциал в повышении герметичности подземных хранилищ, особенно благодаря способности заполнять и закупоривать поры и трещины в горных породах. Уреазные бактерии способствуют осаждению карбоната кальция (CaCO_3) непосредственно в микроскопических разломах, что существенно снижает проницаемость породы и эффективно блокирует возможные пути утечки CO_2 [45].

К числу значимых преимуществ относится возможность локального применения технологии: процесс может быть избирательно активирован в зонах, где имеются потенциальные риски нарушений герметичности. Это делает метод высокоточным и управляемым, в отличие от традиционных средств изоляции [46]. Кроме того, все компоненты, участвующие в процессе – мочевины, ионы кальция и микроорганизмы – экологически безопасны, что дополнительно подчёркивает устойчивость биоцементационного подхода.

Промышленные и экологические применения.

Помимо применения в геотехнических и строительных отраслях, технология микробиологической цементации может быть эффективно использована в нефтегазовой индустрии, например, для обработки углеродсодержащих выбросов и отходов. В этом контексте микробная обработка потоков, насыщенных CO_2 , способствует его минерализации в виде карбонатов, превращая вредные выбросы в полезные минеральные продукты, которые могут быть использованы повторно или проданы на рынке.

Таким образом, метод микробиологической минерализации углерода представляет собой не только способ сокращения углеродного следа, но и

инновационный подход к использованию CO_2 как ценного ресурса. Многофункциональность технологии делает её особенно перспективной в условиях глобальных вызовов по обеспечению климатической устойчивости [44].

Применение МІСР в удалении тяжёлых металлов из почвы и воды.

В дополнение к этому технология биоцементации используется для удаления тяжелых металлов из почвы и воды. Микробно-индуцированное осаждение карбонатов представляет собой эффективный биологический процесс, при котором уреазы продуцирующие бактерии разлагают мочевины, повышая рН и способствуя образованию карбонат-ионов. Эти ионы взаимодействуют с тяжелыми металлами, такими как стронций и барий, вызывая их осаждение в виде нерастворимых карбонатов. Таким образом, МІСР может применяться для очистки загрязнённых почв и сточных вод, эффективно связывая и выводя тяжёлые металлы из окружающей среды [46].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Микробно-индуцированное осаждение карбонатов – перспективная технология для достижения углеродной нейтральности, преобразующая CO_2 в стабильные минеральные формы. Несмотря на вызовы, такие как необходимость оптимизации процессов и масштабирования, МОК представляет собой экономически эффективное решение для улавливания углерода.

Для повышения устойчивости технологии важно пересмотреть источники реагентов (мочевина, кальций, углерод) и способы энергоснабжения. Использование экологически безопасных альтернатив, таких как «зелёный» аммиак и возобновляемая энергия, может значительно снизить углеродный след. Это сделает МОК не только климатически нейтральным, но и активным инструментом в борьбе с изменением климата.

Необходимы дальнейшие исследования для раскрытия полного потенциала МОК и его внедрения в практику. Ключевые рекомендации включают изучение воздействия на микроорганизмы в почве, повышение эффективности при смягчении пылевых бурь, исследование долговечности и устойчивости к климатическим изменениям, а также использование дешевых альтер-

нативных субстратов и интеграцию с другими методами стабилизации почвы.

В долгосрочной перспективе МОК может стать важной технологией для улучшения качества почвы, борьбы с эрозией и улавливания углерода, но для этого нужны дополнительные исследования и оптимизация процессов.

REFERENCES

1. DeJong J.T., Mortensen B.M., Martinez B.C., Nelson D.C. Biomediated soil improvement// *Ecological Engineering*. – 2010. – Vol. 36, № 2. – P. 197–210.
2. Kurmanbaev A.A., Nagmetova G.Zh., Bizhanova L.Zh., et al. Isolation of ureolytic bacteria promising for microbiologically induced calcium carbonate precipitation// *Actual Problems of Humanities and Natural Sciences*. – 2017. – Vol. 4, № 1.
3. Patil M., Dalal P.H., Shreedhar S., Dave T.N., Iyer K.R.K. Biostabilization techniques and applications in civil engineering: State-of-the-art// *Construction and Building Materials*. – 2021. – Vol. 309. – Article ID 125098.
4. Ta Tang C.-S., Yin L.-Y., Jiang N.-J., Zhu C., Zeng H., Li H., Shi B. Factors affecting the performance of microbial-induced carbonate precipitation (MICP) treated soil: a review// *Environmental Earth Sciences*. – 2020. – Vol. 79. – Article № 94.
5. Karol R.H. *Chemical grouting and soil stabilization*. 3rd ed. – Boca Raton: CRC Press, 2003.
6. Burrell A.L., Evans J.P., De Kauwe M.G. Anthropogenic climate change has driven over 5 million km² of drylands towards desertification// *Nature Communications*. – 2020. – Vol. 11. – Article № 3853.
7. Harran R., Terzis D., Laloui L. Mechanics, modeling, and upscaling of biocemented soils: A review of breakthroughs and challenges// *International Journal of Geomechanics*. – 2023. – Vol. 23, № 9.
8. Zhang Y.S., Liu Y., Sun X.D., Zeng W., Xing H.P., Lin J.Z., Kang S.B., Yu L. Application of microbially induced calcium carbonate precipitation (MICP) technique in concrete crack repair: A review// *Construction and Building Materials*. – 2023. – Vol. 359. – Article № 134313.
9. Bhutange S.P., Latkar M.V., Muhammad S. A review on the potential challenges in the application of biocementation in cement-based materials, possible solutions and way forward// *Materials Today Communications*. – 2024. – Vol. 38. – Article № 107986.
10. Kumar A., Song H.-W., Mishra S., Zhang W., Zhang Y.-L., Zhang Q.-R., Yu Z.-G. Application of microbial-induced carbonate precipitation (MICP) techniques to remove heavy metal in the natural environment: A critical review// *Chemosphere*. – 2023. – Vol. 318. – Article № 137894.
11. Sun X., Wai O.W.H., Xie J., Li X. Biomineralization to prevent microbially induced corrosion on concrete for sustainable marine infrastructure// *Environmental Science & Technology*. – 2023. – Vol. 58, № 1. – P. 522–533.

12. Saracho A.C., Marek E.J. Uncovering the dynamics of urease and carbonic anhydrase genes in ureolysis, carbon dioxide hydration, and calcium carbonate precipitation// *Environmental Science & Technology*. – 2024. – Vol. 58, № 2. – P. 1199–1210.
13. Zhu T., Dittrich M. Carbonate precipitation through microbial activities in natural environment, and their potential in biotechnology: A review// *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. – 2016. – Vol. 4. – Article 4.
14. Jain S., Fang C., Achal V. A critical review on microbial carbonate precipitation via denitrification process in building materials// *Geotechnical and Geological Engineering*. – 2021. – Vol. 39. – P. 7529–7551.
15. Lai H., Ding X., Cui M., Zheng J., Chen Z., Pei J., Zhang J. Mechanisms and influencing factors of biomineralization-based heavy metal remediation: A review// *Biogeotechnics*. – 2023. – Vol. 1, № 4. – Article 100039.
16. Mondal S., Ghosh A.D. Review on microbial induced calcite precipitation mechanisms leading to bacterial selection for microbial concrete// *Construction and Building Materials*. – 2019. – Vol. 225. – Article 115236.
17. Castanier S., Le Métayer-Levrel G., Perthuisot J.-P. Bacterial roles in the precipitation of carbonate minerals// In: Riding R.E., Awramik S.M. (eds.) *Microbial sediments*. – Vol. 5. – Berlin: Springer, 2000. – P. 32–39.
18. Dhama N.K., Reddy M.S., Mukherjee A. Biomineralization of calcium carbonate polymorphs by the bacterial strains isolated from calcareous sites// *Journal of Microbiology and Biotechnology*. – 2013. – Vol. 23, № 5. – P. 707–714.
19. Anbu P., Kang C.-H., Shin Y.-J., So J.-S. Formations of calcium carbonate minerals by bacteria and its multiple applications// *SpringerPlus*. – 2016. – Vol. 5. – Article 250.
20. Wang Y.N., Li S.K., Li Z.Y., Garg A. Exploring the application of the MICP technique for the suppression of erosion in granite residual soil in Shantou using a rainfall erosion simulator// *Acta Geotechnica*. – 2023. – Vol. 18. – P. 3273–3285.
21. Payan M., Khoshdel Sangdeh M., Salimi M., Zanganeh Ranjbar P., Arabani M., Hosseinpour I. A comprehensive review on the application of microbially induced calcite precipitation (MICP) technique in soil erosion mitigation as a sustainable and environmentally friendly approach// *Results in Engineering*. – 2024. – Article 103235.
22. Jain S. Influence of biomass and chemicals on kinetics of ureolysis-based carbonate biomineral precipitation// *Environmental Earth Sciences*. – 2024. – Vol. 83. – Article 58.
23. Liu S.Y., Wang R.K., Yu J., Peng X.Q., Cai Y.Y., Tu B.X. Effectiveness of the anti-erosion of an MICP coating on the surfaces of ancient clay roof tiles// *Construction and Building Materials*. – 2020. – Vol. 243. – Article 118202.
24. Rui Y.F., Qian C.X. Characteristics of different bacteria and their induced biominerals// *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. – 2022. – Vol. 115. – P. 488–502.
25. Dong Z.H., Pan X.H., Tang C.S., Wang D.L., Wang R., Shi B. An efficient microbial sealing of rock weathering cracks using bio-carbonation of reactive magnesia cement// *Construction and Building Materials*. – 2022. – Vol. 352. – Article 130038.
26. Haouzi F.Z., Esnault-Filet A., Courcelles B. Optimization of microbially induced calcite precipitation (MICP) protocol against erosion// *Environmental Geotechnics*. – 2020.
27. Siddhartha M., Bikas S.R., Joydeep M. Effect of biologically induced cementation via ureolysis in stabilization of silty soil// *Geomicrobiology Journal*. – 2021. – Vol. 39, № 1. – P. 1–9.

28. Lv C., Tang C.S., Zhang J.Z., Pan X.H., Liu H. Effects of calcium sources and magnesium ions on the mechanical behavior of MICP-treated calcareous sand: Experimental evidence and precipitated crystal insights// *Acta Geotechnica*. – 2022. – Vol. 18, № 5. – P. 1623–1635.
29. Zheng X.G., Lu X.Y., Zhou M., Huang W., Zhong Z.T., Wu X.H., Zhao B.Y. Experimental study on mechanical properties of root-soil composite reinforced by MICP// *Materials*. – 2022. – Vol. 15, № 10. – Article 3586.
30. Hu Q.Z., Wang Z.K. Experimental study on microbial solidification of gravel-containing silty clay under different calcium sources// *Geofluids*. – 2022.
31. Prongmanee N., Horpibulsuk S., Dulyasucharit R., Noulmanee A., Boueroy P., Chancharoonpong C. Novel and simplified method of producing microbial calcite powder for clayey soil stabilization// *Geomechanics and Energy Environment*. – 2023. – Vol. 35. – Article 100480.
32. Vaskevicius L., Malunavicius V., Jankunec M., Lastauskiene E., Talaikis M., Mikoliunaite L., Maneikis A., Gudiukaite R. Insights in MICP dynamics in urease-positive *Staphylococcus* sp. H6 and *Sporosarcina pasteurii* bacterium// *Environmental Research*. – 2023. – Vol. 234. – Article 116588.
33. Liu B., Xie Y.H., Tang C.S., Pan X.H., Jiang N.J., Singh D.N., Cheng Y.J., Shi B. Bio-mediated method for improving surface erosion resistance of clayey soils// *Engineering Geology*. – 2021. – Vol. 19. – Article 106295.
34. Yi H.H., Zheng T.W., Jia Z.R., Su T., Wang C.G. Study on the influencing factors and mechanism of calcium carbonate precipitation induced by urease bacteria// *Journal of Crystal Growth*. – 2021. – Vol. 564. – Article 126113.
35. Wang Q., Miao Q.M., Liu F., Wang X.W., Xu Q.Y. Coupled effect of microbiologically induced calcium carbonate and biofilms in leachate// *Journal of Environmental Management*. – 2022. – Vol. 324. – Article 116350.
36. Cheng L., Shahin M.A., Mujah D. Influence of key environmental conditions on microbially induced cementation for soil stabilization// *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. – 2017. – Vol. 143, № 1. – Article 04016083.
37. Ji X.L., Tang C.S., Pan X.H., Cheng Y.J., Shi B. Enhancing biocementation performance in low permeability clayey soil through sand column strategy// *Catena*. – 2024. – Vol. 245. – Article 108301.
38. Al-Salloum Y., Abbas H., Sheikh Q.I., Hadi S., Alsayed S., Almusallam T. Effect of some biotic factors on microbially-induced calcite precipitation in cement mortar// *Saudi Journal of Biological Sciences*. – 2017. – Vol. 24, № 2. – P. 286–294.
39. Li J., Tian L.J., Xu Y., Tian Z.F., Zhang Z.D. Study on the solidification effect of dredger fill by microbial-induced calcium precipitation (MICP)// *Materials*. – 2022. – Vol. 22, № 15. – Article 7891.
40. Milani D., Kiani A., Haque N., Giddey S., Feron P. Green pathways for urea synthesis: A review from Australia's perspective// *Sustainable Chemistry for Climate Action*. – 2022. – Vol. 1. – Article 100008.
41. Salmon N., Bañares-Alcántara R. Green ammonia as a spatial energy vector: A review// *Sustainable Energy & Fuels*. – 2021. – Vol. 5, № 11. – P. 2814–2839.
42. Fang C., Achal V. Enhancing carbon neutrality: A perspective on the role of Microbially Induced Carbonate Precipitation (MICP)// *Biogeotechnics*. – 2024. – Vol. 2, № 2. – Article 100083.

43. Achal V., Mukherjee A., Kumari D., Zhang Q. Biomineralization for sustainable construction: A review of processes and applications// *Earth-Science Reviews*. – 2015. – Vol. 148. – P. 1–17.

44. Phillips A.J., Lauchnor E., Eldring J., Esposito R., Mitchell A.C., Gerlach R., Cunningham A.B., Spangler L.H. Potential CO₂ leakage reduction through biofilm-induced calcium carbonate precipitation// *Environmental Science & Technology*. – 2013. – Vol. 47, № 1. – P. 142–149.

45. Tveit S., Pettersson P., Landa-Marbán D. Optimizing sealing of CO₂ leakage paths with microbially induced calcite precipitation under uncertainty// In: *ECMOR XVII – 17th European Conference on the Mathematics of Oil Recovery*. – European Association of Geoscientists & Engineers, 2020. – P. 1–12.

46. Li M., Cheng X., Guo H. Heavy metal removal by biomineralization of urease producing bacteria isolated from soil// *International Biodeterioration and Biodegradation*. – 2013. – Vol. 76. – P. 81–85.

ТҮЙІН

А.К. Аманбосын¹, А.А. Курманбаев¹

БИОЦЕМЕНТАЦИЯНЫҢ ТОПЫРАҚТЫ НЫҒАЙТУ МЕН КӨМІРТЕКТІ САҚТАУ МӘСЕЛЕЛЕРІНДЕГІ МАҢЫЗЫ

¹Ө.О. Оспанов атындағы Қазақ топырақтану және агрохимия ғылыми-зерттеу институты, 050060, Алматы, Әл-Фараби даңғылы, 75 В, Қазақстан,

e-mail: aamanbossyn@gmail.com

Микробиологиялық карбонат тұндыру (МКТ) - топырақты нығайту үшін микроорганизмдердің, атап айтқанда *Sporosarcina pasteurii* бактериясының белсенділігіне негізделген, экологиялық таза әрі болашағы зор технология. Бұл үдеріс бактериялардың мочевины мен кальций иондары сияқты химиялық заттармен өзара әрекеттесуін қамтиды, соның нәтижесінде кальцит тұнбалары түзіліп, топырақ құрылымы нығаяды. Мұның нәтижесінде топырақтың беріктігі артып, өткізгіштігі төмендейді және эрозияға төзімділігі күшейеді. Мақалада биоцементация түрлері мен механизмдері, сондай-ақ МКТ тиімділігіне әсер ететін негізгі факторлар - микроорганизмдерді таңдау, орта жағдайлары және топырақ құрамы қарастырылады. Биоцементацияның тиімділігін арттыру әдістері сипатталып, технологияның құмды және әлсіз сазды топырақтарды жақсартудағы қолдану аясы талқыланады. Әсіресе экологиялық аспектілерге, соның ішінде көміртекті секвестрлеуге арналған МКТ қолдануына ерекше назар аударылған, бұл көміртекті топырақта ұзақ мерзімді сақтауға мүмкіндік береді және климаттың өзгеруімен күреске үлес қосады. Қорытындыда болашақ зерттеулердің бағыттары мен осы технологияны құрылыс және геотехника салаларында кеңінен қолдану мүмкіндіктері сөз болады.

Түйінді сөздер: микробиологиялық карбонат тұндыру, биоцементация, көміртекті аулау және сақтау, мочевины, кальций карбонаты.

SUMMARY

A.K. Amanbossyn¹, A.A. Kurmanbayev¹

THE ROLE OF BIOCEMENTATION IN ADDRESSING SOIL STABILIZATION AND CARBON SEQUESTRATION ISSUES

¹U.U. Uspanov Kazakh Research Institute of Soil Science and Agrochemistry, 050060, Almaty, 75 V, Al-Farabi Ave., Kazakhstan, e-mail: aamanbossyn@gmail.com

Microbiologically induced carbonate precipitation (MICP) is an environmentally friendly and promising technology for soil stabilization, based on the activity of microorganisms such as *Sporosarcina pasteurii*, which promote the precipitation of calcium carbonates. This process involves the biological interaction of bacteria with chemical compounds such as urea and calcium

ions, resulting in the formation of calcite deposits that reinforce soil structure by increasing its strength, reducing permeability, and improving erosion resistance. The article discusses the types and mechanisms of biocementation, as well as key factors affecting the efficiency of MICP, including the selection of microorganisms, environmental conditions, and soil composition. Methods for optimizing biocementation to achieve maximum efficiency are described, along with various applications of the technology, such as the improvement of sandy and weak clay soils. Special attention is given to environmental aspects, particularly the use of MICP for carbon sequestration, which contributes to long-term carbon storage in soils and helps mitigate climate change. The conclusion discusses prospects for further research and possible directions for expanding the application of this technology in construction and geotechnics.

Keywords: microbiologically induced carbonate precipitation, biocementation, carbon capture and storage, urea, calcium carbonate.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

1. Аманбосын Алина Қуанышқызы – инженер-микробиолог отдела плодородия и биологии почв, ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0005-2464-2264>, e-mail: aamanbossyn@gmail.com

2. Қурманбаев Асқар Абылайканович – главный научный сотрудник отдела плодородия и биологии почв, д.б.н., профессор, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-4384-7634>, e-mail: wberel@gmail.com

MPNТИ 68.05.29; 68.05.45

DOI: 10.51886/1999-740X_2025_4_80

**Г.Н. Бисенова^{1*}, А.Ж. Темирханов¹, Ж.Б. Текебаева¹, Ж.А. Нұрбекова²,
Д.О. Евнеева¹, А.Б. Абжалелов², Ж.М. Бекшин¹**

**ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ФЕРМЕНТИРОВАННОГО ПЕРЕГНОЯ КРС
НА КАЧЕСТВО ПОЧВЫ И ЗДОРОВЬЕ РАСТЕНИЙ**

¹ТОО «Республиканская коллекция микроорганизмов»,

010000, Астана, ул. Ш. Уалиханова, 13/1, Казахстан,

**e-mail: bisenova84@mail.ru*

²АО «Евразийский национальный университет им. Гумилева»,

010008, Астана, ул. Сатпаева, 2, Казахстан

Аннотация. Снижение качества почвы становится существенным процессом деградации почвы. Оптимизация методов внесения органических удобрений в пахотные имеет важное значение для повышения урожайности сельскохозяйственных культур и здоровья почвы. Целью данной статьи является сбор и обобщение результатов исследований, посвящённых влиянию ферментированного перегноя крупного рогатого скота (КРС) на плодородие почвы, её физико-химические свойства, биологическую активность и урожайность различных сельскохозяйственных культур. В обзоре статьи представлен всесторонний анализ влияния органического удобрения (ферментированного перегноя КРС) на свойства почвы, включая физические, химические и биологические параметры. В обзоре рассматриваются некоторые особенности взаимодействия между органическими удобрениями и почвой, подчеркивается воздействие на структуру почвы, доступность питательных веществ, микробную активность и общее здоровье почвы. Кроме того, в обзоре обсуждается роль органических удобрений в снижении деградации почвы, повышении урожайности сельскохозяйственных культур и продвижении устойчивых методов ведения сельского хозяйства.

Ключевые слова: ферментированный перегной КРС, навоз, плодородие почвы, питательные вещества, сельскохозяйственные культуры.

Отходы животноводства являются ценным органическим удобрением, применение которого оказывает комплексное положительное действие на почву и растительную продукцию. В связи с острым дефицитом органического вещества в земледелии следует более полно использовать все возможные ресурсы органических удобрений. В связи с этим, современное ведение сельского хозяйства в Казахстане ориентировано на переработку много-тоннажных производственных отходов животноводства для вторичного использования. Применение такого рода удобрений позволяет устранить дисбаланс питательных элементов в почве, утилизировать отходы животно-

водства, производить экологически безопасную и качественную продукцию растениеводства [1-3].

Органические удобрения - это материалы с определенным химическим составом и высокой питательной ценностью, которые могут обеспечить достаточное количество питательных веществ для роста растений [4, 5]. Органические удобрения в основном изготавливаются путем компостирования навоза животных и растительного материала (например, соломы и садовых отходов) под действием микроорганизмов, ферментирующихся при высоких температурах. Ферментированный навоз это навоз, прошедший аэробную или анаэробную ферментацию [6]. Орга-

нические удобрения улучшают структуру почвы, обеспечивают широкий спектр питательных веществ для растений и добавляют в почву полезные микроорганизмы [7, 8].

Из всех видов органических удобрений главное место по значимости для сельского хозяйства занимает навоз крупного рогатого скота (КРС). Навоз КРС – ценнейшее органическое удобрение, которое содержит в своем составе основные питательные вещества, необходимые растениям – азот, фосфор, калий, магний, железо, а также микроэлементы – бор, молибден, кобальт, марганец, медь, цинк и другие. Использование навоза как важного источника питательных элементов для растений позволяет улучшить баланс питательных веществ в земледелии и способствует повышению урожая и его качества. Является главным поставщиком необходимых для роста растений органических минеральных веществ, микроэлементов, источником увеличения содержания в почве гумуса [9].

Кроме того, под влиянием органического вещества навоза усиливаются микробиологические процессы в почве, в результате повышается растворимость, а следовательно, и доступность растениям элементов минерального питания. Например, нерастворимые фосфаты кальция, железа, алюминия и другие формы переходят в соединения, усвояемые растениями. Фосфор, потребленный микроорганизмами и закрепленный в плазме при их отмирании, переходит в легкоусвояемые растениями соединения [10-12].

Чрезмерное использование химических удобрений под сельскохозяйственных культуры [13] может привести к закислению и уплотнению почвы [14], вызвать снижение микробной функции и разнообразия [15] и изменить процессы микробиома [16]. Эти изменения могут отрицательно повлиять на экологию

почвы и безопасность пищевых продуктов. Органические удобрения являются многообещающей альтернативой химическим удобрениям [17, 18].

Применение органических удобрений может не только улучшить структуру и плодородие почвы, но и увеличить содержание в ней органического углерода и других питательных веществ [19, 20]. Органические удобрения могут предотвратить негативные последствия использования синтетических удобрений в традиционном сельском хозяйстве, при этом способствуя улучшению питания почвы и поддержанию микробных сообществ [21, 22]. В некоторых случаях, например, в яблоневых садах, органические удобрения, применяемые отдельно или с химическими удобрениями, уменьшали ущерб от выщелачивания нитратов и улучшали скорость и эффективность денитрификации [23]. Длительное применение органических удобрений также способствовало усилению функциональных признаков почвы и повышению ее устойчивости [24].

Проблема управления плодородием почв становится все более актуальной в связи с резким ухудшением их состояния, все возрастающей антропогенной деградацией, которая способствует увеличению доли малопродуктивных и трудно осваиваемых почв.

Важно отметить, что отечественные научно-исследовательские работы по использованию в агротехнологиях органических удобрений на основе ферментированного перегноя КРС, как правило, отсутствуют, либо мало литературной информации. Нет сведений о влиянии этого вида удобрения на продуктивность различных культур. В связи с этим актуальны исследования по агрономической эффективности органического удобрения на основе ферментированного перегноя КРС при возделывании сельскохозяйственных культур.

Таким образом, *цель исследования* – оценка влияния использования ферментированного перегноя на основе производственных отходов КРС на плодородие почвы и продуктивность сельскохозяйственных культур.

Исследование воздействия ферментированного навоза на структуру и плодородие почвы

Почва уникальный объект для исследования. Она является основным средством производства растениеводческой продукции, обеспечивающей сырьевую базу для многих отраслей промышленности и кормопроизводства. Сохранение и воспроизводство почвенного плодородия остается актуальной проблемой современности [25].

Плодородие почвы в значительной степени зависит от содержания в ней органического вещества. Важнейшим источником восполнения его запасов, разрушающихся при интенсивных способах земледелия, являются органические удобрения. Главное место среди органических удобрений принадлежит навозу, эффективность которого проверена многовековой практикой земледелия.

На получение высокой урожайности культурных растений значительное влияние оказывает гумусный состав почв, который из-за интенсивного использования уменьшается в среднем за десять лет на 1,5-2,5%. Нарращивания гумусного горизонта можно добиться за счет обогащения почвы органикой [26].

Систематическое, ежегодное применение 6-7 т/га перегноя, или 14-18 т/га навоза обеспечивают бездефицитный баланс почвенного гумуса [27].

Из-за высокого содержания в свежем навозе растворимых соединений азота он также действует на растение, как и минеральные удобрения: вызывает усиленный рост листьев и стеблей, например, ботвы у картофеля и корнеплодов. Это, как правило, не кор-

релирует с увеличением продуктивной части урожая [28]. К тому же удобренные свежим навозом посевы становятся более чувствительными к болезням и вредителям. Внесение свежего навоза нецелесообразно еще и потому, что в почве он ускоренно минерализуется, вследствие чего его последствие резко снижается [29, 30].

Несмотря на важность ископаемых и агрогенных ресурсов, навоз продолжает оставаться важным источником сырья для производства полноценных, экологичных органических удобрений. В их общем объеме подстилочный навоз и компосты (на основе навоза) составляют сегодня около 80 % [31].

Как считают многие исследователи, удобрения являются мощным рычагом регулирования качества получаемой продукции растениеводства. В частности внесение азотных удобрений способствует наряду с повышением урожайности семян и содержания жира масличных культур, значительному улучшению технологических качеств жира, изменяя соотношение в нем ненасыщенных жирных кислот [32-34].

В настоящее время 40-60% производства зерновых зависит от удобрений, а к 2050 году почти 110% производства зерна будет зависеть от удобрений. Фосфор является одним из важнейших макроэлементов для оптимального производства сельскохозяйственных культур, а его дефицит приводит к снижению роста и задержке созревания [35]. При внесении неорганического фосфора в почву только 10-20% усваивается культурами [36-38], тогда как остальная часть осаждается посредством реакций адсорбции и осаждения с такими катионами, как кальций, магний, железо и алюминий в зависимости от типа почвы [39, 40].

Навоз может подвергаться анаэробной ферментации естественным образом, что приводит к расщеп-

лению его компонентов с образованием стабильного твердого дигестата вместе с биогазом. Он может производить гуминовые и органические кислоты, которые могут изменять осаждение и адсорбцию фосфора в почве [41, 42].

С органическими удобрениями в почву поступает около 25% углерода, 32% азота, 29% фосфора и 47% калия от всего количества питательных элементов, вносимых в почву со всеми удобрениями [43]. Помимо этого, органические удобрения могут также улучшать физико-химические и биологические свойства почвы, а также доступность микро- и макроэлементов для растений, тем самым поддерживая более высокую урожайность сельскохозяйственных культур и устойчивость агроэкосистем [44].

Гумусированные почвы отличаются лучшими физическими свойствами, благоприятными водно-воздушным, тепловым и фитосанитарным режимами, повышенной биологической активностью, устойчивостью к эрозионным процессам. Почвенно-поглощающий комплекс гумусированных почв обладает достаточной емкостью и буферностью для поглощения тяжелых металлов, остатков пестицидов и токсинов биоты, препятствуя их поступлению в грунтовые воды, растения и атмосферу [45].

Известно, что внесение 10 т/га навоза эквивалентно образованию ~1 т гумуса. Кроме углерода 1 т подстилочного навоза содержит 4-6 кг общего азота (в том числе 1,5-2 кг аммонийного), 2-4 кг фосфора, 5-6 кг калия [46].

Органические удобрения в целом оказывают положительное действие не только на бедные, но и на богатые органическим веществом почвы. При внесении органического вещества в почву наблюдается повышение как общей численности микроорганизмов, так и отдельных групп (нитрифицирующих целлюлозоразлагающих, аммонифицирующих, актиномицетов) [47].

В отличие от азотных удобрений, которые не имеют последствия, навоз, обладает последствием на 2-3 года обеспечивает прибавки урожая в течение этого периода [48].

Известно, что при поступлении в почву богатых азотом органических соединений активизируется протеолитическая система почвы, целлюлоза индуцирует рост целлюлазной активности почвы, декстраны повышают активность декстраназы, фосфорорганические соединения активизируют действие фосфогидролаз, различные фенолсодержащие соединения индуцируют накопление фенолоксидаз [49].

Под влиянием удобрений дыхание почв обычно усиливается в результате ускоренного разложения органических соединений почвы, в том числе и гумуса [50].

Оценка влияния ферментированного навоза на рост и урожайность сельскохозяйственных культур

В развитых странах мира органическое сельское хозяйство интенсивно развивается [51, 52]. При органическом производстве необходимо отказаться от использования промышленных минеральных удобрений. Минеральные удобрения обеспечивают высокие урожаи, но могут ухудшить качество продукции, вызывая накопление нитратов и других вредных веществ [53]. Органические удобрения более безопасны и могут применяться с высокой эффективностью на разных культурах. Эффективность органических удобрений повышается при использовании в севооборотах [54, 55]. В некоторых опытах было показано, что внесение навоза в дозе 40 т/га увеличивало урожайность картофеля сорта Беллароза на 25-30% [56]. Так же было установлено, что совместное внесение минеральных и органических удобрений (N60P90K60 кг/га + навоз 40 т/га) повышало урожайность картофеля сорта Аладин на 40-50% [57].

Горшки, обработанные ферментированным навозом и половиной рекомендуемых норм фосфорного удобрения, улучшают параметры роста пшеницы больше, чем неферментированный навоз и контроль. Максимальная высота растения (96,66 см) была зафиксирована при ферментированном навозе и 90 кг/га P, тогда как неферментированный навоз с той же нормой фосфора дал высоту 89,00 см. Данные показывают, что наибольшее увеличение длины корня, 13,23 см, было достигнуто при внесении ферментированного навоза и 90 кг/га P [58].

Zilio и др. [59] отметили, что урожайность кукурузы, получавшей дигестат на основе ила, была равна растениям, выращенным с мочевиной. Остаточные эффекты органических удобрений заметно улучшили рост и урожайность, а применение навоза (FYM)+75% NPK заметно улучшило высоту растений, побеги, содержание хлорофилла и урожайность зерна.

Экспериментальные результаты Yu и др. [60] показали, что применение органических удобрений оказало благоприятное влияние на рост метелки, площадь зеленых листьев, завязывание семян и конечную урожайность зерна риса.

Более того, результаты исследования Чжоу и др. [61] показали, что применение органических удобрений увеличило урожайность пшеницы на 26,4-44,6%, а кукурузы – на 12,5-40,8% по сравнению с химическими удобрениями.

Применение органических удобрений также улучшает качество урожая. Например, Гао и др. [44] отметили значительное увеличение концентрации крахмала, белка, аминокислот и углеводов в кукурузе после применения органических удобрений. Кроме того, другие авторы также сообщили о заметном улучшении урожайности, концентрации белка и углеводов при применении органических удобрений [62-65].

Применение 12 т/га навоза совместно с NPK (NPKM) увеличило как урожай культуры, так и общее количество растворимых твердых веществ (TSS) в нем на 48% и 7,9% соответственно. В тоже время возросли в почве показатели органического углерода, общее содержание солей и доступный P с применением FYM в указанной дозе. Величина pH почвы стабилизировалась на уровне 7,8-8,2 [66].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Органическое удобрение в виде ферментированного перегноя KPC – долговременный, фундаментальный фактор стабилизации производства сельскохозяйственной продукции. Применение органических удобрений оказывает многостороннее действие на все агрономически важные функции почвы и позволяет вовлечь в хозяйственно-биологический круговорот элементы минерального питания, отчуждаемые с урожаем. Они повышают общую устойчивость агроэкосистем к различным стрессорам и служат эффективным средством оздоровления почвы.

Систематическое применение органических удобрений способствует накоплению гумуса, улучшает физико-химические свойства почвы: увеличивает запас питательных веществ; понижает кислотность; повышает содержание поглощенных оснований, поглотельную способность и буферность, влагоемкость, скважность и водопроницаемость; обогащает почву микрофлорой; усиливает ее биологическую активность и выделение углекислоты; уменьшает сопротивление почвы при механической обработке; создает оптимальные условия для минерального питания растений; повышает устойчивость растениеводства к неблагоприятным погодным условиям.

Таким образом, для сохранения плодородия сельскохозяйственных угодий необходимо компенсировать потери питательных элементов, выносимых

с урожаем сельскохозяйственных культур. Одним из эффективных способов восстановления продуктивности почв и культур является компостирование отходов различных производств, из которых наибольшей удобрительной

ценностью обладают органические отходы животноводства. Важным требованием при компостировании является максимальное сохранение питательных для растений веществ и элементов и гомогенность структуры смеси.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы выражают благодарность Министерству науки и высшего образования РК за финансовую поддержку грантового проекта AP23483695 «Разработка биопрепаратов для ускоренной ферментации отходов крупного рогатого скота» (2024-2026).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Chatterjee R. et al. Recycling of organic wastes for sustainable soil health and crop growth// International Journal of Waste Resources.–2017.–Vol. 7, № 3. – P. 296-301.
2. Ahmad R. et al. Bio-conversion of organic wastes for their recycling in agriculture: an overview of perspectives and prospects// Annals of microbiology. – 2007. – Vol.57. – P.471-479.
3. Wei Y. et al. Recycling of nutrients from organic waste by advanced compost technology-A case study// Bioresource Technology. – 2021. – Vol.337. – P. 125-411.
4. Moller K., and Schultheiss U. Chemical characterization of commercial organic fertilizers// Archives Agron. Soil Sci. – 2015. – Vol. 61, № 7. – P. 989–1012.
5. Rajan J. and Anandhan S. V. Survey on nutrient content of different organic fertilizers// Environ. Monit. Assess. – 2015. – Vol. 187, № 6. – P. 385.
6. Chew K.W., Chia S.R., Yen H.W., Nomanbhay S., Ho Y.C. and Show P.L. Transformation of biomass waste into sustainable organic fertilizers// Sustainability. – 2019. – Vol. 11, № 8. – P. 2266.
7. Brar B.S., Singh J., Singh G. and Kaur G. Effects of long term application of inorganic and organic fertilizers on soil organic carbon and physical properties in maize-wheat rotation// Agron. (Basel). – 2015. – Vol. 5, № 2. – P. 220–238.
8. Maltas A., Kebli H., Oberholzer H. R., Weisskopf P. and Sinaj S. The effects of organic and mineral fertilizers on carbon sequestration, soil properties, and crop yields from a long-term field experiment under a Swiss conventional farming system// Land Degrad. Dev. – 2018. – Vol. 29, № 4. – P. 926–938.
9. Кольга Д.Ф. Новые технологии и технические средства утилизации навоза на животноводческих фермах и комплексах. – Минск: БГАТУ, 2014. – 144 с.
10. Минеев В.Г., Сычев В.Г., Гамзиков Г.П. и др. Агрохимия. – М.: Классический университетский учебник для стран СНГ. – М.: Изд-во ВНИИА имени Д.Н. Прянишникова, 2017. – 854 с.
11. Ranjha M.M. et al. Applications of biotechnology in food and agriculture: A mini-review// Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section B: Biological Sciences. – 2022. – Vol. 92, № 1. – P. 11–15.
12. Aiysha D., Latif Z. Insights of organic fertilizer micro flora of bovine manure and their useful potentials in sustainable agriculture// Plos one. – 2019. – Vol. 14, № 12. – P. e0226155.
13. Wang T., Cheng K.K., Huo X.J., Meng P.P., Cai Z.H., Wang Z.K., Zhou J. Bioorganic fertilizer promotes pakchoi growth and shapes the soil microbial structure// Front Plant

Sci. - 2022. - Vol.13. - P. 1040437.

14. Wang C., Zheng M.M., Song W.F., Wen S.L., Wang B.R., Zhu C.Q., Shen R.F. Impact of 25 years of inorganic fertilization on diazotrophic abundance and community structure in an acidic soil in Southern China// *Soil Boil Biochem.* - 2017. - Vol.113. - P. 240-249.

15. Liang Y.T., Ning D.L., Lu Z.M., Zhang N., Hale L., Wu L.Y., Clark I.M., McGrath S.P., Storkey J., Hirsch P.R., Sun B., Zhou J.Z.. Century long fertilization reduces stochasticity controlling grassland microbial community succession// *Soil Boil Biochem.* - 2020. - Vol.151. - P. 108023.

16. Feng M.M., Adams J.M., Fan K.K., Shi Y., Sun R.B., Wang D.Z., Guo X.S., Chu H.Y. Long-term fertilization influences community assembly processes of soil diazotrophs// *Soil Boil Biochem.* - 2018. - Vol. 126. - P. 151-158.

17. Gouda S., Kerry R.G., Das G., Paramithiotis S., Shin H-S., Patra J.K. Revitalization of plant growth promoting rhizobacteria for sustainable development in agriculture// *Microbiol Res.* - 2018. - Vol.206. - P. 131-140.

18. Dincă L.C., Grenni P., Onet C., Onet A. Fertilization and soil microbial community: a review// *Applied Sciences.* - 2022. - Vol.12. - P. 1198.

19. Diacono M. and Montemurro F. Long-term effects of organic amendments on soil fertility. A review// *Agron. Sustain. Dev.* - 2010. - Vol. 30(2). - P. 401-422.

20. Liu Y., Zhao L., Wang Z., Liu L., Zhang P., Sun J., et al. Changes in functional gene structure and metabolic potential of the microbial community in biological soil crusts along a revegetation chronosequence in the Tengger Desert// *Soil Biol. Biochem.* - 2018. - Vol.126. - P. 40-48.

21. Chowdhury S.P., Babin D., Sandmann M., Jacquiod S., Sommermann L., Sørensen S.J., Fliessbach A., Mäder P., Geistlinger J., Smalla K., Rothballer M., Grosch R. Effect of long-term organic and mineral fertilization strategies on rhizosphere microbiota assemblage and performance of lettuce// *Environ Microbiol.* - 2019. - Vol.21. - P. 2426-2439.

22. Guo S., Tao C., Jousset A., Xiong W., Wang Z., Shen Z., Wang B., Xu Z., Gao Z., Liu S., Li R., Ruan Y., Shen Q., Kowalchuk G.A., Geisen S. Trophic interactions between predatory protists and pathogen-suppressive bacteria impact plant health// *ISME J.* - 2022. - Vol.16. - P. 1932-1943.

23. Kramer S.B., Reganold J.P., Glover J.D., Bohannan B.J.M., Mooney H.A. Reduced nitrate leaching and enhanced denitrifier activity and efficiency in organically fertilized soils// *Proc Natl Acad Sci USA.* - 2006. - Vol.103. - P. 4522-4527.

24. Luo J.P., Liao G.C., Banerjee S., Gu S.H., Liang J.B., Guo X.Y., Zhao H.P., Liang Y.C., Li T.Q. Long-term organic fertilization promotes the resilience of soil multifunctionality driven by bacterial communities// *Soil Biol Biochem.* - 2023. - Vol.177. - P. 108922.

25. Коростелёва Л.А., Коцаев А.Г. Основы экологии микроорганизмов: учебное пособие. Санкт-Петербург: Лань, 2013. - С. 193-196.

26. Чехунов О.А., Чехунова Г.С., Воронин В.В. Агрегат для приготовления компостов с использованием эффективных микроорганизмов// *Техника и технологии в животноводстве.* - 2020. - № 2(38). - С. 80-85.

27. Абеленцев В. Пожнивные остатки: правила утилизации// *Защита растений.* - 2015. - №8. - С. 10.

28. Онегов А. Древнее искусство – органическое земледелие// *Наука и жизнь.* - 2001. - №10. - С. 105-109.

29. Глинушкин А.П., Соколов М.С., Торопова Е.Ю. Фитосанитарные и гигиенические требования к здоровой почве. - М.: Агрорус, 2016. - 288 с.

30. Чекмарев П.А., Родионов В.Я., Лукин С.В. Опыт использования органических удобрений в Белгородской области// Достижения науки и техники АПК. - 2011. - № 2. - С. 3-4.
31. Кудеяров В.Н., Соколов М.С., Глинушкин А.П. Современное состояние почв агроценозов России, меры по их оздоровлению и рациональному использованию// Агрохимия. - 2017. - №6. - С.3-11.
32. Loveland P., Webb J. Is there a critical level of organic matter in the agricultural soils of temperate regions: a review// Soil Till. Res. – 2003. – Vol. 70(1). – P. 1–18.
33. Сальникова Н.А. Почвенные микробиоценозы как индикаторы процессов деградации экосистем// Тез. докл. Всерос. научн. конф. студентов, аспирантов и молод. ученых. - М., 2006. - С. 210–212.
34. Павлова Н.Н., Егорова Е.И. Биологическая активность почв как биоиндикатор загрязнения тяжелыми металлами и радионуклидами (на примере почв г. Обнинска)// Тез. докл. IV регион. конф. “Техногенные системы и экологический риск”. - Обнинск, 2007. - С. 96-100.
35. Bashir S., Anwar S., Ahmad B., Sarfraz Q., Khattak W., Islam M. Response of wheat crop to phosphorus levels and application methods// J. Environ. Earth Sci. – 2015. – V.5. – P.9.
36. Sattari S.Z., Bouwman A.F., Giller K.E., van Ittersum M.K. Residual soil phosphorus as the missing piece in the global phosphorus crisis puzzle// Proc. Natl. Acad. Sci. USA. - 2012. – Vol. 109. – P. 6348-6353.
37. Aziz M.Z., Yaseen M., Naveed M., Wang X., Fatima K., Saeed Q., Mustafa A. Polymer-Paraburkholderia phytofirmans PsJN coated diammonium phosphate enhanced microbial survival, phosphorous use efficiency and production of wheat// Agronomy. – 2020. –Vol. 10. – P. 1344.
38. Arfan-ul-Haq R. M., Yaseen M., Naveed M., Mustafa A., Siddique S., Alamri S., Siddiqui M.H., Al-Amri A.A., Alsubaie Q.D., Ali H.M. Deciphering the potential of bioactivated rock phosphate and di-ammonium phosphate on agronomic performance, nutritional quality and productivity of wheat (*Triticum aestivum* L.)// Agronomy. – 2021. – Vol. 11. – P.684.
39. Zhang M., Li C.L., Li Y.C., Harris W.G. Phosphate minerals and solubility in native and agricultural calcareous soils// Geoderma. – 2014. – Vol. 232. – P.164-171.
40. Gérard F. Clay minerals, iron/aluminum oxides, and their contribution to phosphate sorption in soils - A myth revisited// Geoderma. – 2016. – Vol. 262. – P. 213-226.
41. Mustafa A., Hu X., Abrar M.M., Shah S.A.A., Nan S., Saeed Q., Kamran M., Naveed M., Conde-Cid M., Hongjun G. et al. Long-term fertilization enhanced carbon mineralization and maize biomass through physical protection of organic carbon in fractions under continuous maize cropping// Appl. Soil Ecol. – 2021. – Vol. 165. – P. 103971.
42. Holatko J., Hammerschmiedt T., Mustafa A., Kintl A., Radziemska M., Baltazar T., Jaskulska I., Malicek O., Latal O., Brtnicky M. Carbon-enriched organic amendments differently affect the soil chemical, biological properties and plant biomass in a cultivation time-dependent manner// Chem. Biol. Technol. Agric. – 2022. – Vol. 9. – P. 1–13.
43. Tan F., Wang Z., Zhouyang S.Y., Li H.L., Xie Y.P., Wang Y.P., Zheng Y.M., Li Q.B. Nitrogen and phosphorus removal coupled with carbohydrate production by five microalgae cultures cultivated in biogas slurry// Bores. Technol. – 2016. – Vol. 221. – P. 385–393.
44. Gao C., El-Sawah A.M., Ali D.F.I., Alhaj Hamoud Y., Shaghaleh H., Sheteiwy M.S. The integration of bio and organic fertilizers improve plant growth, grain yield, quality and metabolism of hybrid maize (*Zea mays* L.)// Agronomy. – 2020. – Vol. 10. – P. 319.

45. Соколов М.С., Спиридонов Ю.Я., Глинушкин А.П., Торопова Е.Ю. Органическое удобрение – эффективный фактор оздоровления почвы и индуктор её супрессивности// Достижения науки и техники АПК. - 2018. - Т.32. - №1. - С.4-12.
46. Торопова Е.Ю., Соколов М.С., Глинушкин А.П. Индукция супрессивности почвы – важнейший фактор лимитирования вредоносности корневых инфекций// Агрохимия. 2016. - № 8. - С. 44–55.
47. Громова В.С., Пчеленок О.А., Шушпанов А.Г. Изучение влияния современных видов пестицидов на биологическую активность почвы// Экология ЦЧО РФ. - 2012. - №2 (29). - С. 128-130.
48. М.С. Соколов, А.М. Семёнов, Ю.Я. Спиридонов и др. Важнейшие экосистемные функции почвы агросферы и социосферы// Защита зерновых культур от болезней, вредителей, сорняков: достижения и проблемы: мат-лы Международной научно-практической конференции. Б. Вяземы: ВНИИФ, 2016. - С. 207–227.
49. Иванцова Е.А. Влияние пестицидов на микрофлору почвы и полезную биоту. Вестник Волгоградского государственного университета. Серия 11, Естественные науки. 2013. - № 1 (5). - С. 35-40.
50. Куликова А. В., Савельев В. В. Почвенная микрофлора и ее значение для агрономии. - СПб: Политехника, 2014.
51. Харитонов С.А. Органическое сельское хозяйство как инновационное направление в аграрном развитии// Аграрная Россия. – 2011. – №2. – С. 54-56.
52. Willer H., Lernoud J. The World of Organic Agriculture: Statistics and Emerging Trends. FiBL–IFOAM Report. – Frick and Bonn, 2016. – P. 34–114.
53. Чекмарев П.А., Лукин С.В. Система удобрения в условиях биологизации земледелия// Достижения науки и техники АПК. – 2012. – №12. – С. 10-12.
54. Теучеж А.А. Разработка технологического регламента при подготовке к использованию навоза крупного рогатого скота в качестве органического удобрения// Матер. V междунар. науч.-эколог. конф. КубГАУ. – 2017. – С. 782–788.
55. Шарипова Д.С., Айтбаев Т.Е. Влияние различных видов севооборота на поражённость вредными организмами и продуктивность картофеля на юго-востоке Казахстана// Изденістер, нәтижелер – Исследования, результаты. – Алматы, 2017. – № 3(75). – С. 373–378.
56. Ширинкин А.В., Шишкина С.В., Ермаков А.А. Влияние органических удобрений на продуктивность картофеля// Агрохимия. - 2017. - №1. - С. 64-68.
57. Кузнецова Е.В., Гуляев А.И., Воробьев В.Н. Влияние удобрений на продуктивность картофеля// Земледелие. - 2020. - №4. - С. 38-40.
58. Tabbassum R., Naveed M., Mehboob I., Babar M.H., Holatko J., Akhtar N., Rafique M., Kucerik J., Brtnicky M., Kintl A. et al. Comparative Response of Fermented and Non-Fermented Animal Manure Combined with Split Dose of Phosphate Fertilizer Enhances Agronomic Performance and Wheat Productivity through Enhanced P Use Efficiency// Agronomy. – 2022. – Vol. 12. – P. 2335.
59. Zilio M., Pigoli A., Rizzi B., Herrera A., Tambone F., Geromel G., Meers E., Schoumans O., Giordano A., Adani F. Using highly stabilized digestate and digestate-derived ammonium sulphate to replace synthetic fertilizers: The effects on soil, environment, and crop production// Sci. Total Environ. – 2022. – Vol. 815. – P. 152919.
60. Yu H., Ding W., Luo J., Geng R., Cai Z. Long-term application of organic manure and mineral fertilizers on aggregation and aggregate-associated carbon in a sandy loam soil// Soil. Tillage Res. – 2012. – Vol. 124. – P. 170–177.

61. Zhou Z., Zhang S., Jiang N., Xiu W., Zhao J., Yang D. Effects of organic fertilizer incorporation practices on crops yield, soil quality, and soil fauna feeding activity in the wheat-maize rotation system// *Front. Environ. Sci.* – 2022. – Vol. 10. – P. 2292.

62. Mahmood F., Khan I., Ashraf U., Shahzad T., Hussain S., Shahid M., Abid M., Ullah S. Effects of organic and inorganic manures on maize and their residual impact on soil physico-chemical properties// *J. Soil. Sci. Plant Nutr.* – 2017. – Vol. 17. – P. 22–32.

63. Islam M.A., Ferdous G., Akter A., Hossain M.M., Nandwani D. Effect of organic, inorganic fertilizers and plant spacing on the growth and yield of cabbage// *Agriculture.* – 2017. – Vol. 7. – P. 31.

64. Ma X., Li H., Xu Y., Liu C. Effects of organic fertilizers via quick artificial decomposition on crop growth// *Sci. Rep.* – 2021. – Vol.11. – P. 1-7.

65. Wu S., Shi Z., Chen X., Gao J., Wang X. Arbuscular mycorrhizal fungi increase crop yields by improving biomass under rainfed condition: A meta-analysis// *Peer J.* – 2022. – Vol.10. – P. 12861.

66. Мазиров М.А., Беленков А.И., Абудудзяба З., Заитунгули К. Влияние удобрений на плодородие почвы и урожай зеленой массы сладкого сорго// *Владимирский земледелец.* – 2022. – № 3. – С. 10-17.

REFERENCES

1. Chatterjee R. et al. Recycling of organic wastes for sustainable soil health and crop growth// *International Journal of Waste Resources.* – 2017. – Vol.7, №3. – P. 296-301.

2. Ahmad R. et al. Bio-conversion of organic wastes for their recycling in agriculture: an overview of perspectives and prospects// *Annals of microbiology.* – 2007. – Vol.57. – P. 471-479.

3. Wei Y. et al. Recycling of nutrients from organic waste by advanced compost technology-A case study// *Bioresource Technology.* – 2021. – Vol. 337. – P. 125-411.

4. Moller K., and Schultheiss U. Chemical characterization of commercial organic fertilizers// *Archives Agron. Soil Sci.* – 2015. – Vol. 61, № 7. – P. 989-1012.

5. Rajan J., and Anandhan S.V. Survey on nutrient content of different organic fertilizers// *Environ. Monit. Assess.* – 2015. – Vol. 187, № 6. – P. 385.

6. Chew K. W., Chia S.R., Yen H.W., Nomanbhay S., Ho Y.C., and Show P.L. Transformation of biomass waste into sustainable organic fertilizers// *Sustainability.* – 2019. – Vol. 11, № 8. – P. 2266.

7. Brar B. S., Singh J., Singh G. and Kaur G. Effects of long term application of inorganic and organic fertilizers on soil organic carbon and physical properties in maize-wheat rotation// *Agron. (Basel).* – 2015. – Vol. 5, № 2. – P. 220-238.

8. Maltas A., Kebli H., Oberholzer H.R., Weisskopf P. and Sinaj S. The effects of organic and mineral fertilizers on carbon sequestration, soil properties, and crop yields from a long-term field experiment under a Swiss conventional farming system// *Land Degrad. Dev.* – 2018. – Vol. 29, № 4. – P. 926-938.

9. Kol'ga D.F. *Novye tehnologii i tehicheskie sredstva utilizacii navoza na zhivotnovodcheskih fermah i kompleksah.* – Minsk: BGATU, 2014. – 144 s.

10. Mineev V.G., Sychev V.G., Gamzikov G.P. i dr. *Agrohimija.* – M.: Klassicheskiy universitetskij uchebnik dlja stran SNG. – M.: Izd-vo VNIIA imeni D.N. Prjanishnikova, 2017. – 854 s.

11. Ranjha M.M. et al. Applications of biotechnology in food and agriculture: A mini-

review// Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section B: Biological Sciences. - 2022. - Vol. 92, № 1. - P. 11-15.

12. Aiysha D., Latif Z. Insights of organic fertilizer micro flora of bovine manure and their useful potentials in sustainable agriculture// Plos one. - 2019. - Vol.14 (12). - P. E0226155.

13. Wang T., Cheng K.K., Huo X.J., Meng P.P., Cai Z.H., Wang Z.K., Zhou J. Bioorganic fertilizer promotes pakchoi growth and shapes the soil microbial structure// Front Plant Sci. - 2022. - Vol.13. - P.1040437.

14. Wang C., Zheng M.M., Song W.F., Wen S.L., Wang B.R., Zhu C.Q., Shen R.F. Impact of 25 years of inorganic fertilization on diazotrophic abundance and community structure in an acidic soil in Southern China// Soil Boil Biochem. - 2017. - Vol.113. - P. 240-249.

15. Liang Y.T., Ning D.L., Lu Z.M., Zhang N., Hale L., Wu L.Y., Clark I.M., McGrath S.P., Storkey J., Hirsch P.R., Sun B., Zhou J.Z.. Century long fertilization reduces stochasticity controlling grassland microbial community succession// Soil Boil Biochem. - 2020. - Vol.151. - P.108023.

16. Feng M.M., Adams J.M., Fan K.K., Shi Y., Sun R.B., Wang D.Z., Guo X.S., Chu H.Y. Long-term fertilization influences community assembly processes of soil diazotrophs// Soil Boil Biochem. - 2018. - Vol. 126. - P. 151-158.

17. Gouda S., Kerry R.G., Das G., Paramithiotis S., Shin H-S., Patra J.K. Revitalization of plant growth promoting rhizobacteria for sustainable development in agriculture// Microbiol Res. - 2018. - Vol. 206. - P. 131-140.

18. Dincă L.C., Grenni P., Onet C., Onet A. Fertilization and soil microbial community: a review// Applied Sciences. - 2022. - Vol.12. - P. 1198.

19. Diacono M., and Montemurro F. Long-term effects of organic amendments on soil fertility. A review// Agron. Sustain. Dev. - 2010. - Vol.30 (2). - P. 401-422.

20. Liu Y., Zhao L., Wang Z., Liu L., Zhang P., Sun J., et al. Changes in functional gene structure and metabolic potential of the microbial community in biological soil crusts along a revegetation chronosequence in the Tengger Desert// Soil Biol. Biochem. - 2018. - Vol. 126. - P. 40-48.

21. Chowdhury S.P., Babin D., Sandmann M., Jacquiod S., Sommermann L., Sørensen S.J., Fliessbach A., Mäder P., Geistlinger J., Smalla K., Rothballer M., Grosch R. Effect of long-term organic and mineral fertilization strategies on rhizosphere microbiota assemblage and performance of lettuce// Environ Microbiol. - 2019. - Vol.21. - P.2426-2439.

22. Guo S., Tao C., Jousset A., Xiong W., Wang Z., Shen Z., Wang B., Xu Z., Gao Z., Liu S., Li R., Ruan Y., Shen Q., Kowalchuk G.A., Geisen S. Trophic interactions between predatory protists and pathogen-suppressive bacteria impact plant health// ISME J. - 2022. - Vol.16. - P.1932-1943.

23. Kramer S.B., Reganold J.P., Glover J.D., Bohannan B.J.M., Mooney H.A. Reduced nitrate leaching and enhanced denitrifier activity and efficiency in organically fertilized soils// Proc Natl Acad Sci USA. - 2006. - Vol.103. - P. 4522-4527.

24. Luo J.P., Liao G.C., Banerjee S., Gu S.H., Liang J.B., Guo X.Y., Zhao H.P., Liang Y.C., Li T.Q. Long-term organic fertilization promotes the resilience of soil multifunctionality driven by bacterial communities// Soil Biol Biochem. - 2023. - Vol.177. - P. 108922.

25. Korosteljova L.A., Koshhaev A.G. Osnovy jekologii mikroorganizmov: uchebnoe posobie. Sankt-Peterburg: Lan', 2013. - S.193-196.

26. Chehunov O.A., Chehunova G.S., Voronin V.V. Agregat dlja prigotovlenija kompostov s ispol'zovaniem jeffektivnyh mikroorganizmov// Tehnika i tehnologii v zhivotnovodstve. - 2020. - № 2(38). - S. 80-85.

27. Abelencev V. Pozhivnye ostatki: pravila utilizacii// Zashhita rastenij. - 2015. - №8. - S.10.
28. Onegov A. Drevnee iskusstvo – organicheskoe zemledelie// Nauka i zhizn'. -2001. - №10. - S.105-109.
29. Glinushkin A.P., Sokolov M.S., Toropova E.Ju. Fitosanitarnye i gigienicheskie trebovaniya k zdorovoj pochve. - M.: Agrorus, 2016. - 288 s.
30. Chekmarev P.A., Rodionov V.Ja., Lukin S.V. Opyt ispol'zovanija organicheskikh udobrenij v Belgorodskoj oblasti// Dostizhenija nauki i tehniki APK. - 2011. - №2. - S.3-4.
31. Kudejarov V.N., Sokolov M.S., Glinushkin A.P. Sovremennoe sostojanie pochv agrocenozov Rossii, mery po ih ozdorovleniju i racional'nomu ispol'zovaniju// Agrohimija. - 2017. - №6. - S.3–11.
32. Loveland P., Webb J. Is there a critical level of organic matter in the agricultural soils of temperate regions: a review// Soil Till. Res. - 2003. -Vol.70 (1). - P. 1–18.
33. Sal'nikova N.A. Pochvennye mikrobocenozy kak indikatory processov degradacii jekosistem// Tez. dokl. Vseros. nauchn. konf. studentov, aspirantov i molod. uchenyh. - M., 2006. - S. 210-212.
34. Pavlova N.N., Egorova E.I. Biologicheskaja aktivnost' pochv kak bioindikator zagriznenija tjazhelymi metallami i radionuklidami (na primere pochv g. Obninska)// Tez. dokl. IV region. konf. "Tehnogennye sistemy i jekologicheskij risk". - Obninsk, 2007. - S. 96-100.
35. Bashir S., Anwar S., Ahmad B., Sarfraz Q., Khattak W., Islam M. Response of wheat crop to phosphorus levels and application methods// J. Environ. Earth Sci. – 2015. – V.5. – P.9.
36. Sattari S.Z., Bouwman A.F., Giller K.E., van Ittersum M.K. Residual soil phosphorus as the missing piece in the global phosphorus crisis puzzle // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. - 2012. – Vol. 109. – P. 6348-6353.
37. Aziz M.Z., Yaseen M., Naveed M., Wang X., Fatima K., Saeed Q., Mustafa A. Polymer-Paraburkholderia phytofirmans PsJN coated diammonium phosphate enhanced microbial survival, phosphorous use efficiency and production of wheat// Agronomy. – 2020. –Vol. 10. – P. 1344.
38. Arfan-ul-Haq R. M., Yaseen M., Naveed M., Mustafa A., Siddique S., Alamri S., Siddiqui M.H., Al-Amri A.A., Alsubaie Q.D., Ali H.M. Deciphering the potential of bioactivated rock phosphate and di-ammonium phosphate on agronomic performance, nutritional quality and productivity of wheat (*Triticum aestivum* L.)// Agronomy. – 2021. – Vol. 11. – P. 684.
39. Zhang M., Li C.L., Li Y.C., Harris W.G. Phosphate minerals and solubility in native and agricultural calcareous soils// Geoderma. – 2014. – Vol. 232. – P. 164–171.
40. Gérard F. Clay minerals, iron/aluminum oxides, and their contribution to phosphate sorption in soils - A myth revisited// Geoderma. –2016.–Vol.262. – P. 213–226.
41. Mustafa A., Hu X., Abrar M.M., Shah S.A.A., Nan S., Saeed Q., Kamran M., Naveed M., Conde-Cid M., Hongjun G. et al. Long-term fertilization enhanced carbon mineralization and maize biomass through physical protection of organic carbon in fractions under continuous maize cropping// Appl. Soil Ecol. – 2021. – Vol. 165. – P. 103971.
42. Holatko J., Hammerschmidt T., Mustafa A., Kintl A., Radziemska M., Baltazar T., Jaskulska I., Malicek O., Latal O., Brtnicky M. Carbon-enriched organic amendments differently affect the soil chemical, biological properties and plant biomass in a cultivation time-dependent manner// Chem. Biol. Technol. Agric. – 2022. – Vol. 9. – P. 1–13.

43. Tan F., Wang Z., Zhouyang S.Y., Li H.L., Xie Y.P., Wang Y.P., Zheng Y.M., Li Q.B. Nitrogen and phosphorus removal coupled with carbohydrate production by five microalgae cultures cultivated in biogas slurry// *Bores. Technol.* – 2016. – Vol. 221. – P. 385–393.
44. Gao C., El-Sawah A.M., Ali D.F.I., Alhaj Hamoud Y., Shaghaleh H., Sheteiwy M.S. The integration of bio and organic fertilizers improve plant growth, grain yield, quality and metabolism of hybrid maize (*Zea mays L.*)// *Agronomy.* – 2020. – Vol. 10. – P. 319.
45. Sokolov M.S., Spiridonov Ju.Ja., Glinushkin A.P., Toropova E.Ju. Organicheskoe udobrenie – jeffektivnyj faktor ozdorovlenija pochvy i induktor ejo supressivnosti// *Dostizhenija nauki i tehniki APK.* – 2018. – T. 32. – №1. – S. 4-12.
46. Toropova E.Ju., Sokolov M.S., Glinushkin A.P. Indukcija supresivnosti pochvy – vazhnejshij faktor limitirovanija vrednosnosti kornevyh infkcij// *Agrohimiya.* 2016. – №8. – S. 44-55.
47. Gromova V.S., Pchelenok O.A., Shushpanov A.G. Izuchenie vlijanija sovremennyh vidov pesticidov na biologicheskiju aktivnost' pochvy// *Jekologija CChO RF.* – 2012. – №2 (29). – S. 128-130.
48. Vazhnejshie jekosistemnye funkcii pochvy agrosfery i sociosfery / M.S. Sokolov, A.M. Semjonov, Ju.Ja. Spiridonov i dr.// *Zashhita zernovyh kul'tur ot boleznij, vreditelej, sornjakov: dostizhenija i problemy: mat-ly Mezhdunarodnoj nauchnoprakticheskoj konferencii. B. Vjazemy: VNIIF, 2016.* – S. 207–227.
49. Ivancova E.A. Vlijanie pesticidov na mikrofloru pochvy i poleznuju biotu. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. 11, Estestvennye nauki.* – 2013. – № 1(5). – S. 35-40.
50. Kulikova A.V., Savel'ev V.V. Pochvennaja mikroflora i ee znachenie dlja agronomii. – SPb: Politehnika, 2014.
51. Haritonov S.A. Organicheskoe sel'skoe hozjajstvo kak innovacionnoe napravlenie v agrarnom razvitii// *Agrarnaja Rossija.* – 2011. – №2. – S. 54-56.
52. Willer H., Lernoud J. *The World of Organic Agriculture: Statistics and Emerging Trends. FiBL–IFOAM Report.* – Frick and Bonn, 2016. – P. 34–114.
53. Chekmarev P.A., Lukin S.V. Sistema udobrenija v uslovijah biologizacii zemledelija// *Dostizhenija nauki i tehniki APK.* – 2012. – №12. – S. 10-12.
54. Teuchezh A.A. Razrabotka tehnologicheskogo reglamenta pri podgotovke k ispol'zovaniju navoza krupnogo rogatogo skota v kachestve organicheskogo udobrenija// *Mater. V mezhdunar. nauch.-jekolog. konf. Kub GAU.* – 2017. – S. 782-788.
55. Sharipova D.S., Ajtbaev T.E. Vlijanie razlichnyh vidov sevooborota na porazhenost' vrednymi organizmami i produktivnost' kartofelja na jugo-vostoke Kazahstana// *Izdenister, nətizheler-Issledovanija, rezul'taty.* – Almaty. – 2017. – №3 (75). – S. 373-378.
56. Shirinkin A.V., Shishkina S.V., Ermakov A.A. Vlijanie organicheskijh udobrenij na produktivnost' kartofelja// *Agrohimiya.* – 2017. – №1. – S. 64-68.
57. Kuznecova E.V., Guljaev A.I., Vorob'ev V.N. Vlijanie udobrenij na produktivnost' kartofelja// *Zemledelie.* – 2020. – №4. – S. 38-40.
58. Tabbassum R., Naveed M., Mehboob I., Babar M.H., Holatko J., Akhtar N., Rafique M., Kucerik J., Brtnicky M., Kintl A. et al. Comparative Response of Fermented and Non-Fermented Animal Manure Combined with Split Dose of Phosphate Fertilizer Enhances Agronomic Performance and Wheat Productivity through Enhanced P Use Efficiency// *Agronomy.* – 2022. – Vol. 12. – P.2335.
59. Zilio M., Pigoli A., Rizzi B., Herrera A., Tambone F., Geromel G., Meers E., Schoumans O., Giordano A., Adani F. Using highly stabilized digestate and digestate-derived ammonium sulphate to replace synthetic fertilizers: The effects on soil,

environment, and crop production// Sci. Total Environ. – 2022. – Vol. 815. – P. 152919.

60. Yu H., Ding W., Luo J., Geng R., Cai Z. Long-term application of organic manure and mineral fertilizers on aggregation and aggregate-associated carbon in a sandy loam soil// Soil. Tillage Res. – 2012. – Vol. 124. – P. 170-177.

61. Zhou Z., Zhang S., Jiang N., Xiu W., Zhao J., Yang D. Effects of organic fertilizer incorporation practices on crops yield, soil quality, and soil fauna feeding activity in the wheat-maize rotation system// Front. Environ. Sci. – 2022. – Vol. 10. – P. 2292.

62. Mahmood F., Khan I., Ashraf U., Shahzad T., Hussain S., Shahid M., Abid M., Ullah S. Effects of organic and inorganic manures on maize and their residual impact on soil physico-chemical properties// J. Soil. Sci. Plant Nutr. – 2017. – Vol. 17. – P. 22-32.

63. Islam M.A., Ferdous G., Akter A., Hossain M.M., Nandwani D. Effect of organic, inorganic fertilizers and plant spacing on the growth and yield of cabbage// Agriculture. – 2017. – Vol. 7. – P.31.

64. Ma X., Li H., Xu Y., Liu C. Effects of organic fertilizers via quick artificial decomposition on crop growth// Sci. Rep.- 2021. - Vol.11. – P. 1-7.

65. Wu S., Shi Z., Chen X., Gao J., Wang X. Arbuscular mycorrhizal fungi increase crop yields by improving biomass under rainfed condition: A meta-analysis// Peer J. – 2022. –Vol.10. – P.12861.

66. Mazirov M.A., Belenkov A.I., Abududzjaba Z., Zaituniguli K. Vlijanie udobrenij na plodorodie pochvy i urozhaj zelenoj massy sladkogo sorgo// Vladimirsij zemledec. - 2022. - №3. - S.10-17.

ТҮЙІН

Г.Н. Бисенова^{1*}, А.Ж. Темирханов¹, Ж.Б. Текебаева¹, Ж.А. Нұрбекова²,

Д.О. Евнеева¹, А.Б. Абжалелов², Ж.М. Бекшин¹

ІРІ ҚАРА МАЛ ҚОҚЫСЫН ФЕРМЕНТАЦИЯЛАП ҚОЛДАНУДЫҢ ТОПЫРАҚ САПАСЫ
МЕН ӨСІМДІКТЕР ДЕНСАУЛЫҒЫНА ӘСЕРІН БАҒАЛАУ

¹«Микроорганизмдердің республикалық коллекциясы» ЖШС,

010000, Астана, Ш. Уалиханов көш., 13/1, Қазақстан,

*e-mail: bissenova84@mail.ru

²Л.Н. Гумилёв атындағы Еуразия ұлттық университеті,

010008, Астана, Сәтпаев көш., 2, Қазақстан

Топырақ сапасының төмендеуі – топырақтың тозуының маңызды үрдістерінің бірі болып табылады. Ауыл шаруашылығы дақылдарының өнімділігі мен топырақтың денсаулығын арттыру үшін органикалық тыңайтқыштарды егістік алқаптарға енгізу әдістерін оңтайландыру аса маңызды. Бұл мақаланың мақсаты – ірі қара малдың ферменттелген көңінің топырақ құнарлылығына, физикалық қасиеттеріне, биологиясына және әртүрлі ауыл шаруашылығы дақылдарының өнімділігіне әсері жөніндегі зерттеу нәтижелерін жинақтау және қорытындылау болды. Бұл шолуда ірі қара малдың ферменттелген көңінің топырақ қасиеттеріне – физикалық, химиялық және биологиялық параметрлеріне әсері жан-жақты талданды. Шолу барысында органикалық тыңайтқыштар мен топырақ арасындағы күрделі өзара әрекеттестік қарастырылды, топырақ құрылымына, қоректік заттардың қолжетімділігіне, микробтық белсенділікке және жалпы топырақ денсаулығына әсер етуі ерекше атап өтілді. Сонымен қатар, шолу органикалық тыңайтқыштардың топырақтың тозуын азайтудағы, ауыл шаруашылығы дақылдарының өнімділігін арттырудағы және тұрақты ауыл шаруашылығы әдістерін ілгерілетудегі рөлін талқылайды. Атап айтқанда, бұл мақалада екіншілік жүйелерінде қолданылатын

ферменттелген ірі қара көңі түріндегі тыңайтқыштың әсеріне қатысты нәтижелер жинақталған.

Түйінді сөздер: ферменттелген ірі қара көңі, көң, топырақ құнарлылығы, қоректік заттар, ауыл шаруашылығы дақылдары.

SUMMARY

G.N. Bissenova^{1*}, A.Zh. Temirkhanov¹, Zh.B. Tekebaeva¹, Zh.A. Nurbekova²,

D.O. Evneeva¹, A.B. Abzhalelov², Zh.M. Bekshin¹

ASSESSMENT OF THE IMPACT OF FERMENTED CATTLE HUMUS USE ON SOIL QUALITY AND PLANT HEALTH

¹LLP «Republican collection of microorganisms», 010000, Astana,

Sh. Ualikhanov st., 13/1, Kazakhstan,

*e-mail: bissenova84@mail.ru

²L.N. Gumilyov Eurasian National University, 010008, Astana,

Satpaeva, 2, Kazakhstan

Soil quality degradation is becoming a significant process of soil degradation. Optimization of organic fertilizer application methods in arable lands is important to improve crop productivity and soil health. However, this requires a comprehensive study and research on crop productivity and soil quality status in the gradient of application with organic fertilizers. The article review presents a comprehensive analysis of the effect of organic fertilizer (FCM) on soil properties, including physical, chemical and biological parameters. The review discusses the complex interactions between organic fertilizers and soil, emphasizing the effects on soil structure, nutrient availability, microbial activity and overall soil health. In addition, the review discusses the role of organic fertilizers in mitigating soil degradation, increasing crop yields and promoting sustainable agricultural practices. In particular, this paper summarizes the effects of fermented cattle manure fertilizer used in cropping systems.

Keywords: fermented cattle manure, manure, soil fertility, nutrients, crops.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

1. Бисенова Гульмира Нургалиевна – старший научный сотрудник лаборатории микробиологии, к.с.-х.н., ассоциированный профессор, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1758-9451>, e-mail: bissenova84@mail.ru

2. Темирханов Аслан Жанаевич – руководитель проекта, ученый секретарь, к.с.-х.н., ассоциированный профессор, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-8716-1661>, e-mail: aszhte@gmail.com

3. Текебаева Жанар Борамбаевна - старший научный сотрудник лаборатории микробиологии, аспирантура (РФ), ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5855-2655>; e-mail: j.tekebaeva@mail.ru

4. Нұрбекова Жадырасын Ақбергенқызы - старший научный сотрудник лаборатории генетики и биохимии микроорганизмов, PhD, ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0009-8766-4734>, e-mail: zhadyrassyn.nurbekova@gmail.com

5. Евнеева Динара Оралбаевна - научный сотрудник лаборатории микробиологии, докторант, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1547-3551>, e-mail: evdior1@gmail.com

6. Абжалелов Ахан Бегманович – соруководитель проекта, д.б.н., профессор, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3313-3657>, e-mail: ab_akhan@mail.ru

7. Бекшин Жандарбек Мухтарович – генеральный директор, к.м.н., ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-4033-338X>, e-mail: zmbekshin@gmail.com



РАМАЗАНОВА САРА БЕКЕНТАЕВНА
24.05.1936-22.09.2025

Ушла из жизни выдающийся учёный, доктор биологических наук, профессор, академик АСНХ Республики Казахстан **Рамазанова Сара Бекентаевна** – человек редкой научной глубины, принципиальности и душевной щедрости, посвятивший всю свою жизнь служению аграрной науке. **Сара Бекентаевна** родилась 24 мая 1936 года в городе Алма-Ата. После окончания Казахского государственного сельскохозяйственного института в 1959 году она начала свой трудовой путь младшим научным сотрудником Республиканской опытной станции овощного и картофельного хозяйства.

Уже в эти годы проявились её целеустремлённость, высокий профессионализм и искренняя преданность науке. Завершив обучение в аспирантуре Всесоюзного НИИ удобрений и агропочвоведения имени Д.Н. Прянишникова, в 1964–1974 гг. Сара Бекентаевна работала агрохимиком, руководителем аналитической группы и отдела Алма-Атинской зональной агрохимлаборатории и внесла весомый вклад в становление системы агрохимического обеспечения земледелия.

С 1974 по 1981 гг. она возглавляла лабораторию физиологии и биохимии, с 1981 года занимала должность заместителя директора института по научной работе Казахского НИИ риса. В этот период ею был внесен значительный вклад в развитие научных основ рисосеяния Приаралья. Сара Бекентаевна стояла у истоков формирования научных основ азотного режима питания риса и совершенствования приёмов применения азотных удобрений. С 1988 по 2008 годы Сара Бекентаевна возглавляла отдел агрохимии Казахского НИИ земледелия имени В.Р. Вильямса, а с 2008 года и до 9 июня 2025 года продолжала активно трудиться в должности главного научного сотрудника. В этот период под её руководством проводилась координация исследований научных учреждений западного, восточного, южного и юго-восточного регионов Казахстана.

Рамазановой С.Б. принадлежит приоритет в проведении исследований в Казахстане с использованием меченого изотопа азота (^{15}N), позволивших впервые получить объективные данные об истинных коэффициентах использования растениями азота почвы и удобрений, а также уточнить пути его трансформации и перераспределения. Ею разработаны приёмы управления продуктивностью культур по микропериодам органогенеза, ставшие основой для создания наукоёмких агротехнологий для условий юга и юго-востока Казахстана. Под её руководством была сформирована научно-методическая основа проведения агроэкологического мониторинга, апробированная в Кызылординской, Алматинской и Жамбылской областях.

Сара Бекентаевна автор более 150 научных работ, в т.ч. рекомендаций, методических указаний, монографии «Минеральное питание озимой пшеницы на юго-востоке Казахстана» (2017), обладатель 5 авторских свидетельств и 2 патентов на изобретения. Под её руководством подготовлены 1 доктор наук, 5 кандидатов наук, магистранты и доктора PhD. Она была награждена медалью «За доблестный труд» (1970), лауреат Государственной премии имени А. И. Бараева (2001), обладатель медали имени И.И. Синягина «За вклад в развитие аграрной науки» (2006), медали «Еңбек ардагері».

Коллектив Казахского НИИ почвоведения и агрохимии имени У.У. Успанова выражает искренние и глубокие соболезнования родным, близким, ученикам и коллегам Сары Бекентаевны.

**ЧЕРНЕНОК ВАЛЕНТИНА ГРИГОРЬЕВНА****02.04.1937-17.10.2025**

17 октября 2025 года скончалась **Черненко Валентина Григорьевна**, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, академик НАН ВШК, профессор «Казахского агротехнического исследовательского университета им. С. Сейфуллина».

Черненко В.Г. родилась в деревне Суббовичи Брянской области Российской Федерации. Детство ее пришлось на суровые военные годы. В 1959 году закончила Белорусскую Орден Трудового Красного Знамени сельскохозяйственную академию. И по зову сердца уехала работать на целину в Казахстан.

Трудовую деятельность начинала участковым агрономом в совхозе Курский Акмолинской области. Работала в областном управлении сельского хозяйства, главным агрономом по науке Целинного Краевого управления сельского хозяйства. В 1970 г. защитила кандидатскую диссертацию «Азотный режим темно-каштановых почв Северного Казахстана в связи с применением удобрений». Это было первое исследование в данном направлении в регионе.

В.Г. Черненко принадлежит приоритет в изучении всего комплекса вопросов, связанных с применением удобрений в Северном Казахстане, агрохимических свойств темно-каштановых почв и закономерностей их изменения под влиянием различных факторов до разработки методов диагностики и прогноза эффективности удобрений, моделирования почвенных процессов, что отражено в докторской диссертации «Теоретические основы оптимизации и диагностики минерального питания зерновых культур в сухостепной зоне Северного Казахстана (1994)». Результаты исследований нашли отражение более чем в 250 научных статьях и монографиях: «Плодородие почв Северного Казахстана и эффективность удобрений», «Азотный режим почв Северного Казахстана и применение удобрений», «Научные основы и практические приемы управления плодородием почв и продуктивностью культур в Северном Казахстане» и др. Подготовлена и издана учебно-методическая литература. Получено авторское свидетельство на изобретение и патент на полезную модель.

В.Г. Черненко многие годы была руководителем научно-исследовательских проектов. Под ее руководством защищено более 300 дипломных работ, более 30 магистерских диссертаций, 1 кандидатская диссертация и 1 диссертация доктора PhD.

Успехи в производственной, научно-исследовательской и учебно-воспитательной работе отмечены наградами: Медалью «За освоение Целинных земель» (1964), Знаком МСХ СССР и ЦК профсоюзов «Победитель социалистического соревнования - 1979» (1980), Медалью «За трудовую доблесть» (1981), Нагрудным знаком «Отличник образования Казахской ССР» (1981), Знаком МСХ СССР «Отличник социалистического сельского хозяйства» (1982), Медалью «Ветеран Труда» (1989), Нагрудным знаком «Отличник образования Республики Казахстан» (1997), Знаком «Еңбек даңқы» I степени (2012), Медалью «Почетный ветеран» (2015), Знаком «Еңбек даңқы» II степени (2016), Медалью в честь 25-летия Независимости Республики Казахстан (2016), Нагрудным знаком «Ы. Алтынсарин» (2017). В 2017 г. Черненко В.Г. была награждена Орденом «Құрмет».

Светлая память о выдающемся ученом и прекрасном человеке Черненко Валентине Григорьевне навсегда останется в сердцах ученых почвоведов-агрохимиков, коллег и благодарных учеников.

ДЛЯ ЗАМЕТОК

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



9 771999 740000