

Моделирование электропроводности почвы для устойчивого землепользования в районах, подверженных засолению

А. И. Насирова¹, Т. А. Гасанова^{2✉}, Г. Ф. Аскерова¹, Н. А. Абасова²

¹ Институт почвоведения и агрохимии Министерства науки и образования Азербайджанской Республики, Баку, Азербайджанская Республика

² Бакинский государственный университет, Баку, Азербайджанская Республика

✉ E-mail: turkanhesenova@mail.ru

Аннотация. Цель. В этом исследовании целью является изучается пространственная изменчивость электропроводности почвы (ЕС) и ее связь с ключевыми катионами и анионами (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , CO_3^{2-} , HCO_3^- , SO_4^{2-}) вдоль Кура-Араксинской низменности. **Методы.** Применялась комбинация полевых проб почвы, лабораторных анализов и спектральных данных Landsat 8, линейные (MLR, PLSR) и нелинейные (ANN, SVM) подходы моделирования были использованы для оценки и картирования ЕС почвы. **Результаты.** Na^+ и Cl^- определены как основные факторы засоления, причем соли NaCl доминируют в динамике засоления почвы в регионе. Также наблюдались вторичные вклады KCl и MgCl_2 . Прибрежные формы рельефа, такие как лагунные реликты и прибрежные равнины, показали самые высокие уровни солёности, приписываемые геоморфологическим процессам и антропогенной деятельности. Среди предсказательных моделей алгоритм SVM превзошел другие, достигнув более высоких значений R^2 и более низкого RMSE, что подчеркивает его эффективность в захвате сложных взаимодействий почвы и окружающей среды. **Научная новизна.** Засоление почвы является сложной проблемой для сельскохозяйственной производительности и экологической устойчивости, особенно в засушливых и полувзасушливых прибрежных регионах. В этом исследовании подчеркивается полезность цифрового картирования почв (DSM) для оценки засоленности почв и даются практические рекомендации по устойчивому управлению земельными ресурсами, в частности, по снижению засоленности и совершенствованию методов ведения сельского хозяйства в уязвимых системах.

Ключевые слова: электропроводность, солёность, формы рельефа, дистанционное зондирование

Для цитирования: Насирова А. И., Гасанова Т. А., Аскерова Г. Ф., Абасова Н. А. Моделирование электропроводности почвы для устойчивого землепользования в районах, подверженных засолению // Аграрный вестник Урала. 2025. Т. 25, № 08. С. 1199–1208. <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2025-25-08-1199-1208>.

Дата поступления статьи: 17.02.2025, **дата рецензирования:** 02.04.2025, **дата принятия:** 19.05.2025.

Modeling of soil electrical conductivity for sustainable land use in salinized areas

A. I. Nasirova¹, T. A. Hasanova²✉, G. F. Asgarova¹, N. A. Abasova²

¹ Institute of Soil Science and Agrochemistry of Ministry of Science and Education of the Republic of Azerbaijan, Baku, Republic of Azerbaijan

² Baku State University, Baku, Republic of Azerbaijan

✉ E-mail: turkanhesenova@mail.ru

Abstract. Purpose. In this study, the purpose is to investigate the spatial variability of soil electrical conductivity (EC) and its relationship with key cations and anions (Na^+ , 7K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , CO_3^{2-} , HCO_3^{2-} , SO_4^{2-}) along the Kur-Araz lowland. **Methods.** Using a combination of field soil samples, laboratory analyses and Landsat 8 spectral data, linear (MLR, PLSR) and nonlinear (ANN, SVM) modeling approaches were used to estimate and map soil EC. **The results** identified Na^+ and Cl^- as the main drivers of salinity, with NaCl salts dominating the soil salinity dynamics in the region. Secondary contributions of KCl and MgCl_2 were also observed. Coastal landforms such as lagoonal relics and coastal plains showed the highest salinity levels, attributed to geomorphic processes and anthropogenic activities. Among the predictive models, the SVM algorithm outperformed the others, achieving higher R^2 values and lower RMSE, highlighting its effectiveness in capturing complex soil-environment interactions. **Scientific novelty.** Soil salinity is a challenging issue for agricultural productivity and environmental sustainability, especially in arid and semi-arid coastal regions. This study highlights the usefulness of digital soil mapping (DSM) for assessing soil salinity and provides practical recommendations for sustainable land management, particularly for reducing salinity and improving agricultural practices in vulnerable systems.

Keywords: electrical conductivity, salinity, landforms, remote sensing

For citation: Nasirova A. I., Hasanova T. A., Asgarova G. F., Abasova N. A. Modeling of soil electrical conductivity for sustainable land use in salinized areas. *Agrarian Bulletin of the Urals*. 2025; 25 (08): 1199–1208. <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2025-25-08-1199-1208>. (In Russ.)

Date of paper submission: 17.02.2025, **date of review:** 02.04.2025, **date of acceptance:** 19.05.2025.

Постановка проблемы (Introduction)

Электропроводность почвы (ЕС) широко признана надежным индикатором для оценки и мониторинга засоленности почвы. Значения ЕС напрямую коррелируют с концентрацией ионов в почвенном растворе, увеличиваясь по мере увеличения содержания соли в определенных условиях влажности [1; 2]. Однако основная проблема в оценке качества почвы заключается в решении проблемы значительной пространственной и временной изменчивости свойств почвы в различных масштабах наблюдений. Засоление и содификация почвы представляют собой критические процессы деградации почвы, представляющие значительную угрозу для экосистем, особенно в засушливых и полувзасушливых регионах. Эти процессы глубоко влияют на производительность и устойчивость сельского хозяйства, изменяя свойства почвы и снижая плодородие [3; 5; 7]. Доминирование натрия (Na^+) в почвенном растворе приводит к дисперсии глинистых частиц, что нарушает структуру и значительно снижает проницаемость почвы. Среди солей, способствующих засолению, их воздействие уменьшается в порядке $\text{NaCl} > \text{CaSO}_4^{2-} > \text{CaHCO}_3 > \text{MgCl}_2 > \text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$. Повышенная соленость отрицательно влияет на все

аспекты роста растений, нарушая баланс поглощения ионов, вызывая осмотический стресс и ухудшая поглощение воды корнями растений.

Согласно стандартам солености, почвы классифицируются как засоленные, когда их электропроводность насыщенной вытяжки (ЕС_е) превышает 4 дСм·м⁻¹ при 25 °С с процентом обменного натрия (ESP) ниже 15 и pH менее 8,5. Эти почвы характеризуются высокой концентрацией ионов, таких как Na^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , сульфат (SO_4^{2-}) и хлорид (Cl^-). Обнаружение ионов в почвах имеет решающее значение в различных областях, включая здоровье человека, продовольственную безопасность и мониторинг окружающей среды, поскольку концентрации ионов предоставляют важную информацию о качестве почвы и воды. Например, анализ ионов, таких как кальций (Ca^{2+}), натрий (Na^+), калий (K^+) и магний (Mg^{2+}), имеет большое значение для оценки пригодности воды для потребления человеком и сельскохозяйственного орошения. Повышенные концентрации этих ионов указывают на повышенную соленость почвы или натриеватость, что может отрицательно влиять на рост растений. Аналогичным образом мониторинг ионов играет решающую роль в переработке пищевых продуктов, при этом

специфические ионы, такие как нитрат (NO_3^-) и нитрит (NO_2^-) в мясных продуктах, кальций (Ca^{2+}) в молочных продуктах и калий (K^+) во фруктовых соках, являются ключевыми показателями безопасности и качества пищевых продуктов.

Прибрежные регионы, где сходятся наземные и морские экосистемы, крайне восприимчивы к засолению почвы, вызванному как естественными процессами, так и антропогенной деятельностью. Эти районы поддерживают значительную часть населения мира и характеризуются высоким биоразнообразием и уникальными экологическими особенностями. Кроме того, прибрежные зоны функционируют как центры экономической, сельскохозяйственной и рекреационной деятельности. Однако быстрый рост населения и растущие потребности в пресной воде усилили проникновение речной воды в запасы грунтовых вод. Это проникновение соленой воды повышает соленость грунтовых вод, которая впоследствии мигрирует в ризосферу через капиллярное действие, откладывая солевые минералы. Этот процесс отрицательно влияет на плодородие почвы, снижая урожайность сельскохозяйственных культур и в тяжелых случаях вызывая полную потерю урожая.

Дистанционное зондирование является важным инструментом для многомасштабного и долгосрочного мониторинга засоления почв благодаря своей эффективности в получении обширных наборов данных по большим площадям. Однако такие факторы, как атмосферные условия, взаимодействие электромагнитного излучения почвы и атмосферы и перекрывающиеся спектральные сигналы от различных компонентов почвы, могут значительно снизить точность данных дистанционного зондирования, что часто приводит к противоречивым результатам [8–10]. Следовательно, дистанционное зондирование в основном используется для карти-

рования пространственного распределения засоления почв и классификации уровней засоления, а не для получения точных количественных измерений. Для повышения надежности приложений дистанционного зондирования исследователи часто интегрируют спутниковые изображения и данные дистанционного зондирования с наземными полевыми и лабораторными измерениями для оценки и картирования свойств почвы [11; 12]. Линейные многомерные модели, такие как множественная линейная регрессия (MLR) и регрессия с частичными наименьшими квадратами (PLSR), успешно применялись для анализа спектральных моделей поглощения и их взаимосвязей с характеристиками почвы [13–15]. В последние годы нелинейные подходы к моделированию, включая опорные векторные машины (SVM) и искусственные нейронные сети (ANN), приобрели известность благодаря своей превосходной способности улавливать сложные взаимодействия между физическими и химическими свойствами почвы и спектральными данными.

Основными целями данного исследования были:

1. Оценка взаимосвязи между электропроводностью почвы и концентрацией ионов: исследование корреляции между электропроводностью почвы (ECe) и концентрацией ключевых катионов (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) и анионов (Cl^- , CO_3^{2-} , HCO_3^- , SO_4^{2-}) для выявления доминирующих факторов засоления почвы, которые могут негативно повлиять на сельскохозяйственное хозяйство.

2. Характеристика пространственной изменчивости засоления почвы: картирование и анализ пространственного распределения засоления почвы и его связи с геоморфологическими рельефами, включая лагуны, реликты лагун, прибрежные равнины и барьеры, для понимания влияния геоморфологических процессов на динамику засоления.

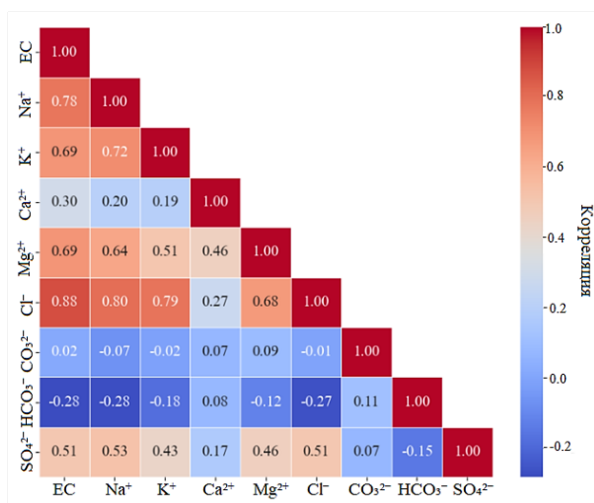


Рис. 1. Карта корреляции электропроводности с катионами и анионами

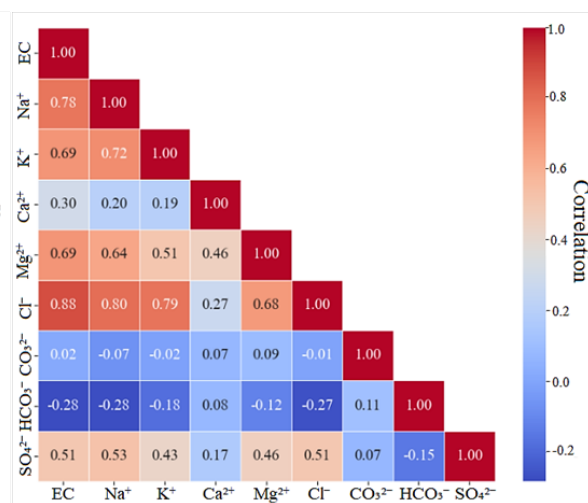


Fig. 1. Conductivity correlation map with cations and anions

3. Производительность алгоритмов цифрового картирования почв (DSM) для моделирования ландшафта солёности: сравнение точности прогнозирования линейных моделей (множественная линейная регрессия (MLR) и регрессии с использованием частичных наименьших квадратов (PLSR)) и нелинейных моделей (машины опорных векторов (SVM) и искусственные нейронные сети (ANN)) при оценке распределения ЕС и ионов в почве с использованием спектральных данных Landsat-8.

4. Разработка структуры для мониторинга и управления солёностью почв для поддержки сельского хозяйства: предоставление действенных идей для управления земельными ресурсами путем интеграции выходных данных DSM с геоморфологическим анализом для информирования об устойчивых методах ведения сельского хозяйства и стратегиях смягчения засоления в уязвимых прибрежных регионах.

Эти цели направлены на углубление понимания динамики засоления почв с использованием современных методов дистанционного зондирования и моделирования для поддержки устойчивого землепользования и продуктивности сельского хозяйства в полупустышном климате с проблемами управления засолением [19].

Методология и методы исследования (Methods)

Исследуемый регион характеризуется полупустышным климатом. Ландшафт включает в себя разнообразные прибрежные формы рельефа, в числе лагуны, реликты лагун, прибрежные равнины и барьеры, каждая из которых существенно влияет на динамику солёности почвы [20]. Эти формы рельефа особенно подвержены засолению из-за геоморфологических процессов и сельскохозяйственной деятельности, что делает их идеальным местом для исследования пространственной изменчивости электропроводности почвы (ЕС) [21]. Была создана систематическая сеть для отбора проб, состоящая из семи параллельных рядов, расположенных на расстоянии 2 км друг от друга, с 20 точками отбора проб в ряду с интервалом 1 км [4; 6]. Образцы почвы отбирались из верхних 20 см почвенного профиля. Образцы высушивались на воздухе, просеивались через сито 2 мм и подвергались лабораторному анализу. Электропроводность (ЕС) насыщенных почвой экстрактов измерялась с помощью измерителя ЕС. Концентрации катионов (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) и анионов (Cl^- , CO_3^{2-} , HCO_3^- , SO_4^{2-}) анализировались в соответствии со стандартизированными протоколами, изложенными в методах анализа почвы. Эти методы обеспечивали точную количественную оценку концентраций ионов, облегчая надежные корреляционные анализы между содержанием ионов и ЕС почвы. Полученный набор данных обеспечил надежную основу для калибровки моделей

дистанционного зондирования и улучшения понимания динамики солёности в пределах исследуемой области [16; 17].

Результаты (Results)

Анализ главных компонент (PCA) использовался для оценки взаимосвязей между электропроводностью почвы (ЕС) и концентрациями измеренных в лаборатории катионов и анионов (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , CO_3^{2-} , HCO_3^- , SO_4^{2-}). Как показано на рис. 2. Cl^- продемонстрировал самую сильную корреляцию с ЕС ($r = 0,88$), за ним следует Na^+ ($r = 0,78$), что указывает на их доминирующее влияние на засоление почвы в исследуемой области. Почвенные ионы K^+ , Mg^{2+} , SO_4^{2-} были следующими по влиянию со значениями корреляции 0,69, 0,69 и 0,51 соответственно. Среди катионов Ca^{2+} продемонстрировал наименьшее влияние на ЕС ($r = 0,30$), тогда как CO_3^{2-} и HCO_3^- имели незначительные или отрицательные корреляции ($r = 0,02$ и $-0,28$ соответственно). Рис. 1. демонстрирует эти взаимосвязи, подчеркивая относительное влияние каждого иона на ЕС почвы. Эти результаты подтверждают, что соли NaCl являются основными факторами засоления почвы в юго-восточном регионе реки Кура. Дальнейший анализ тепловой карты корреляции показывает, что соли KCl оказывают сопоставимое влияние на ЕС, о чем свидетельствуют сильные корреляции между Na^+ , K и Cl^- . Кроме того, значимая связь между Mg^{2+} и Cl^- ($r = 0,68$) подчеркивает большее влияние Mg^{2+} на ЕС по сравнению с Ca^{2+} . Эти результаты подчеркивают важность определенных ионов в формировании динамики засоления исследуемой территории (рис. 1, 2).

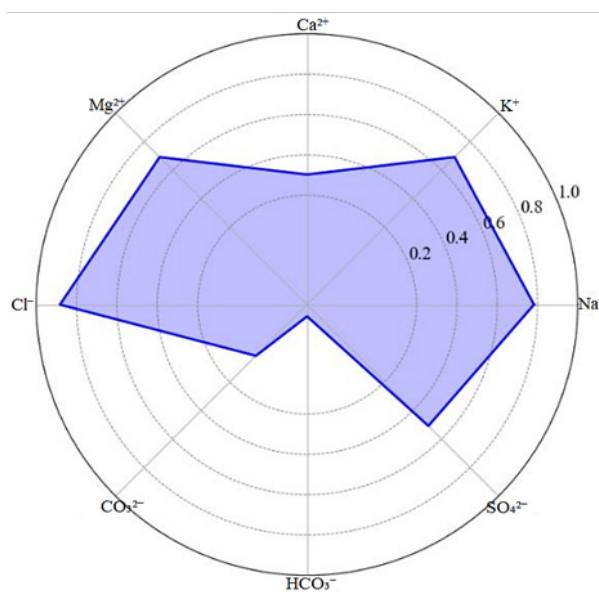


Рис. 2. Радарная диаграмма средних значений ЕС с катионами и анионами
Fig. 2. Radar diagram of average EC values with cations and anions

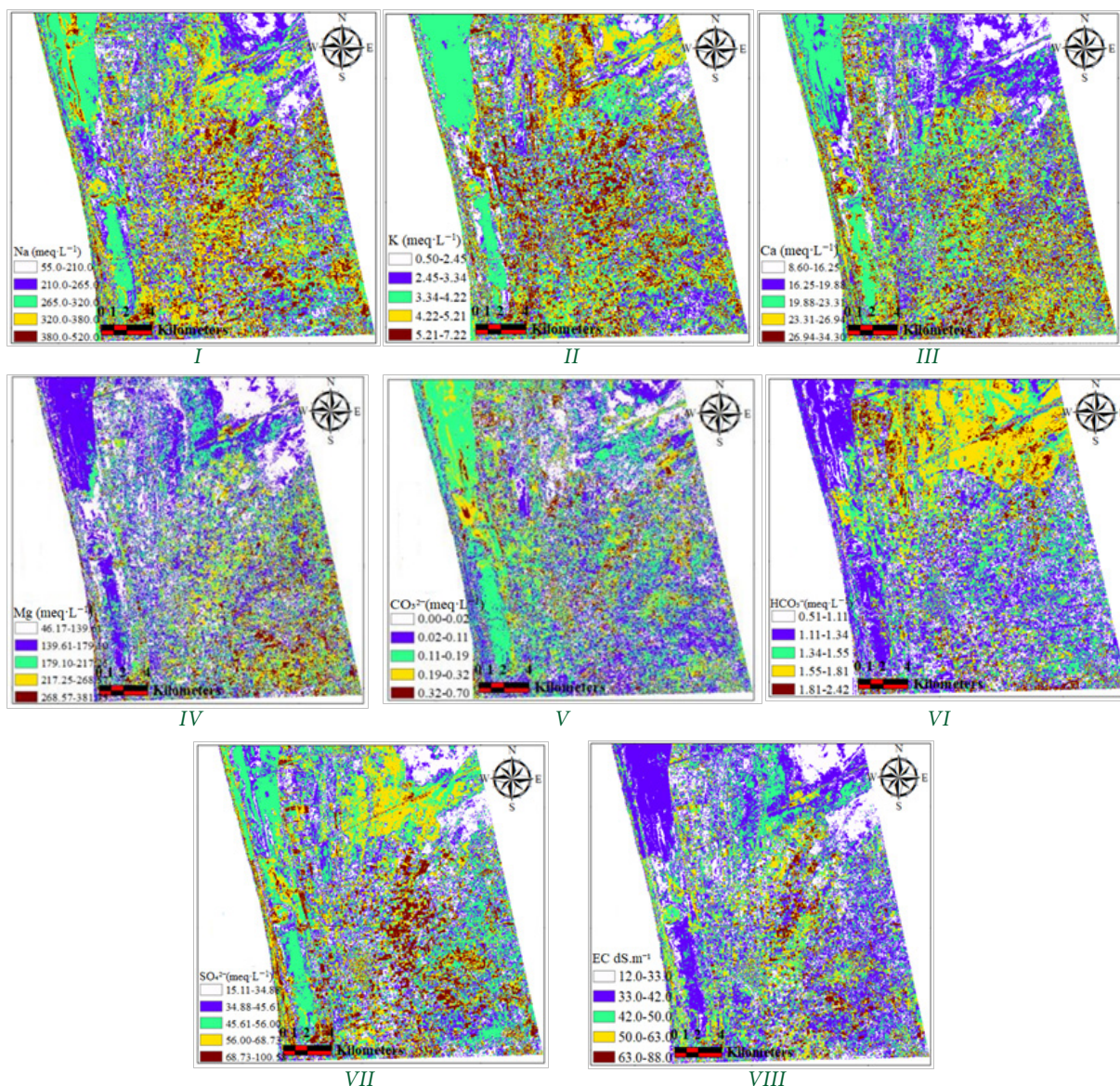


Рис. 3. Карты распределения (I–VIII) EC, Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , CO_3^{2-} , HCO_3^- , SO_4^{2-} почвы в районе исследования
 Fig. 3. Distribution maps (I–VIII) of EC, Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , CO_3^{2-} , HCO_3^- , SO_4^{2-} of soil in the study area

Самые низкие и средние значения Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , CO_3^{2-} , HCO_3^- , SO_4^{2-} и EC почвы преимущественно связаны с современным лагунным рельефом в западной части исследуемой области, расположенной между современным барьером (вблизи береговой линии реки) и старым барьером. Напротив, самые высокие значения EC сосредоточены в прибрежной равнине и реликтовых формах лагунного рельефа, расположенных в центральной и юго-восточной частях исследуемой области. Существует сильное соответствие между распределением EC и моделями Na^+ и Cl^- , за которыми следуют K^+ , Mg^{2+} и SO_4^{2-} ; эти результаты согласуются с метриками проверки, детализируют коэффициенты корреляции, относительные процентные различия (RPD) и среднеквадратические ошибки (RMSE), полученные с использованием как линейных (MLR, PLSR), так и нелинейных (ANN, SVM) алгоритмов.

Превосходная производительность моделей SVM и ANN при захвате сложных взаимосвязей между EC почвы и содержанием ионов дополнительно подтверждает эти наблюдения. Наши результаты показывают, что алгоритм машины опорных векторов (SVM) обеспечил более точные прогнозы электропроводности почвы (EC) и связанных катионов и анионов с использованием спектральных данных Landsat 8 по сравнению с моделями искусственных нейронных сетей (ANN), множественной линейной регрессии (MLR) и регрессии методом частичных наименьших квадратов (PLSR). Средний показатель электропроводности почвы в точках отбора проб составил приблизительно $45 \text{ дС} \cdot \text{м}^{-1}$, что соответствует пространственным закономерностям распределения, наблюдаемым на созданных картах, особенно в регионах, представленных зелеными и синими цветовыми кодами (см. легенду карты). Ре-

зультаты нашей проверки показывают, что модели SVM и ANN обеспечивают превосходную производительность, при этом значения относительной процентной разницы (RPD) превышают 1,1, что указывает на хорошую надежность модели. Напротив, модели MLR и PLSR, которые имели значения RPD ниже 1,1, были менее эффективны при оценке ЕС почвы, по данным Landsat 8. Значения среднеквадратической ошибки (RMSE) также указывают

на более низкие ошибки прогнозирования для SVM и ANN по сравнению с линейными моделями, MLR и PLSR (рис. 3). Кроме того, значения коэффициента детерминации (R^2) для нелинейных моделей (SVM и ANN) были значительно выше, чем у линейных моделей, что подтверждает улучшенные прогностические возможности нелинейных подходов при учете сложных взаимосвязей между свойствами почвы и спектральными данными (таблица 1).

Таблица 1
Результаты проверки оценок и картирования электропроводности почвы
с использованием различных моделей

Table 1
Results of testing estimates and mapping of soil electrical conductivity using different models

		RMSE TEST	RMSE TRAIN	RPD TEST	RPD TRAIN	R^2 TEST	R^2 TRAIN
SVM	EC	27,35	24,62	1,18	1,29	0,36	0,46
	Na ⁺	236,83	283,97	1,19	1,11	0,45	0,29
	K ⁺	2,28	3,27	1,48	1,31	0,64	0,48
	Ca ²⁺	16,71	14,01	1,97	1,13	0,26	0,30
	Mg ²⁺	195,50	164,68	1,05	1,13	0,17	0,37
	Cl ⁻	195,50	164,68	1,05	1,13	0,25	0,44
	CO ₃ ²⁻	0,26	0,29	1,44	1,35	0,69	0,52
	HCO ₃ ⁻	0,60	0,86	1,26	1,14	0,42	0,36
	SO ₄ ²⁻	42,27	38,82	1,14	1,15	0,40	0,31
ANN	EC	27,69	25,85	1,17	1,23	0,27	0,34
	Na ⁺	237,14	257,17	1,19	1,22	0,29	0,34
	K ⁺	2,43	2,99	1,39	1,20	0,51	0,32
	Ca ²⁺	25,96	13,60	1,20	1,16	0,36	0,26
	Mg ²⁺	193,48	155,53	1,06	1,20	0,12	0,31
	Cl ⁻	361,58	217,52	1,11	1,44	0,22	0,52
	CO ₃ ²⁻	0,35	0,35	1,06	1,19	0,12	0,15
	HCO ₃ ⁻	0,58	0,82	1,30	1,20	0,43	0,31
	SO ₄ ²⁻	42,30	41,44	1,14	1,07	0,28	0,14
MLR	EC	30,70	30,82	1,06	1,03	0,11	0,06
	Na ⁺	269,84	301,14	1,04	1,04	0,08	0,08
	K ⁺	3,13	3,60	1,08	1,00	0,15	0,01
	Ca ²⁺	26,04	15,70	0,99	1,00	0,02	0,02
	Mg ²⁺	203,42	180,68	1,01	1,03	0,03	0,06
	Cl ⁻	203,42	180,68	1,01	1,03	0,01	0,13
	CO ₃ ²⁻	0,37	0,32	1,02	1,00	0,14	0,12
	HCO ₃ ⁻	0,70	0,97	1,07	1,02	0,23	0,04
	SO ₄ ²⁻	46,08	43,47	1,04	1,02	0,10	0,05
PLSR	EC	30,95	30,96	1,05	1,02	0,10	0,05
	Na ⁺	278,97	307,53	1,01	1,02	0,03	0,05
	K ⁺	3,13	3,60	1,08	1,00	0,15	0,01
	Ca ²⁺	26,04	15,70	0,99	1,00	0,02	0,02
	Mg ²⁺	203,42	180,68	1,01	1,03	0,03	0,06
	Cl ⁻	414,95	297,49	0,97	1,05	0,07	0,11
	CO ₃ ²⁻	0,37	0,329	1,01	1,00	0,11	0,01
	HCO ₃ ⁻	0,75	0,99	1,00	1,00	0,06	0,01
	SO ₄ ²⁻	46,08	43,47	1,04	1,023	0,097	0,05

Эффективность цифрового картирования почв (DSM) при создании карт свойств почв по категориям зависит от нескольких факторов, включая экономическую эффективность, разрешение выборки, точность модели и выбранный масштаб картирования. Исследуемая территория вдоль юго-восточного побережья реки Куры демонстрирует высокий уровень солености, что классифицирует ее как очень засоленный регион. Сельскохозяйственная деятельность в этой области в значительной степени зависит от эффективных мер по дренажу и рекультивации почвы, а также от выращивания солеустойчивых культур, таких как ячмень. Полевые наблюдения подтвердили, что ячмень, выращиваемый на богарных землях, является доминирующей культурой, что соответствует традиционной практике местных общин, включая зависимость от разведения скота и птиц для получения средств к существованию. Деградация земель, вызванная засолением почвы, наводнениями и чрезмерным использованием полей, является существенным фактором, снижающим продуктивность почвы в регионе.

В этом исследовании подчеркивается влияние прибрежных форм рельефа на модели электропроводности почвы (ЕС) и продуктивность. С использованием Geopedological Definition System (GDS) и геопедологического подхода Цинка были выявлены шесть различных форм рельефа, включая лагуны, лагунные отложения, барьеры и прибрежные равнины. Эти формы рельефа демонстрируют четкую связь между геоморфологическими процессами и ЕС почвы.

Лагунные формы рельефа, определяемые как мелкие водоемы, отделенные от реки барьерами, как было обнаружено, содержат почвы с повышенной соленостью. Это наблюдение согласуется с результатами исследования, которые показали высокие значения ЕС в этих областях. Барьеры и барьерные отмели, описанные как субазральные и пологие формы рельефа, прилегающие к лагунам, показали повышенные уровни ЕС на своих краях с резким снижением в пределах барьерных отмелей, вероятно, из-за движения осадков и процессов выщелачивания. Эти результаты свидетельствуют о том, что динамическое взаимодействие геоморфологических процессов и переноса речной воды значительно влияет на распределение ЕС. Самые высокие уровни ЕС наблюдались в прибрежных равнинах и лагунных реликтовых формах рельефа, которые представляют собой остатки старых лагун. Эти объекты остаются в значительной степени незахороненными, сохраняя соленые характеристики своей исторической среды.

Сходство в моделях распределения ЕС между лагунными отложениями и этими формами рельефа подчеркивает критическую роль прошлых гидрологических и геоморфологических условий. Лагун-

ные отложения, в основном состоящие из песка, ила или глины, переносимых ветром, потоками и течениями, отлагались в низкоэнергетических соленых средах. Наблюдаемое соответствие моделей ЕС в этих отложениях с моделями в прибрежных равнинах и лагунных реликтах усиливает связь между генезисом рельефа и засоленностью почвы. Анализ главных компонентов (РСА) выявил Cl^- и Na^+ основными факторами, вносящими вклад в ЕС почвы, демонстрируя самые сильные корреляции. Эти результаты подчеркивают доминирующую роль солей NaCl в обеспечении засоленности в регионе. Умеренные корреляции между K^+ , Mg^{2+} и SO_4^{2-} с ЕС предполагают дополнительное влияние солей, таких как KCl . Сильная связь между Mg^{2+} и Cl^- дополнительно указывает на значительное влияние Mg^{2+} на засоление почвы, превосходящее влияние Ca^{2+} , который показал самую низкую корреляцию среди исследованных катионов. Незначительные или отрицательные корреляции CO_3^{2-} и HCO_3^- с ЕС подтверждают их ограниченную роль в динамике засоления в этой области, что согласуется с доминированием солей на основе хлоридов.

Исследование подтвердило эффективность алгоритмов DSM при картировании засоленности почвы и связанных с ней свойств с использованием спектральных данных Landsat-8. Среди оцененных моделей алгоритм Support Vector Machine (SVM) продемонстрировал превосходную точность в прогнозировании ЕС почвы и концентраций катионов/анионов, превзойдя модели ANN, MLR и PLSR. Это было очевидно из более высоких значений R^2 и RPD и более низких оценок RMSE для SVM и ANN по сравнению с более низкой производительностью MLR и PLSR. Эти результаты согласуются с предыдущими исследованиями, подчеркивающими преимущества нелинейных моделей в захвате сложных взаимодействий почвы и окружающей среды. Способность алгоритма SVM точно предсказывать ЕС и модели распределения ионов подчеркивает его эффективность для картирования почв в засоленных средах.

Наблюдаемые пространственные закономерности в распределении ЕС и ионов в почве подчеркивают необходимость целевых стратегий рекультивации в прибрежных рельефах. Высокие уровни солености в лагунных отложениях и прибрежных равнинах требуют целенаправленных вмешательств, таких как улучшение дренажа и меры по снижению солености. Напротив, барьерные отмели и современные лагуны с относительно более низкой соленостью представляют возможности для выращивания солеустойчивых культур, таких как ячмень. Интегрируя геоморфологический анализ с результатами DSM, это исследование дает действенные сведения о пространственной изменчивости солености почвы. Эти результаты могут служить руководством для устойчивых методов управления

земельными ресурсами, способствуя повышению производительности почвы и охране окружающей среды в уязвимых прибрежных сельскохозяйственных системах.

Обсуждение и выводы (Discussion and Conclusion)

Это исследование подчеркивает важность понимания динамики засоления почвы в прибрежных регионах, особенно в юго-восточной части реки, где засоление создает значительные проблемы для сельскохозяйственной производительности и экологической устойчивости. Исследование подтверждает, что электропроводность почвы (ЕС) является надежным индикатором засоления, причем основными факторами являются хлорид (Cl^-) и натрий (Na^+). Вторичное влияние калия (K^+), магния (Mg^{2+}) и сульфата (SO_4^{2-}) еще больше подчеркивает сложные взаимодействия между почвенными ионами в формировании моделей засоления. Результаты показывают отчетливую пространственную изменчивость ЕС почвы, связанную с геоморфологическими процессами и характеристиками рельефа. Лагунные отложения, прибрежные равнины и реликтовые формы рельефа лагун демонстрируют самые высокие уровни засоления, что отражает их восприимчивость к вторжению соленой воды и историческим геоморфологическим условиям. Напротив, барьерные отмели и современные лагуны демонстрируют более низкие уровни солёности, предлагая потенциал для устойчивых методов ведения сельского хозяйства. С точки зрения мето-

дологии исследование подчеркивает превосходство нелинейных подходов к моделированию, в частности алгоритма опорной векторной машины (SVM), в прогнозировании распределения ЕС почвы и ионов с использованием спектральных данных Landsat-8. SVM превзошел другие модели, включая искусственные нейронные сети (ANN), множественную линейную регрессию (MLR) и регрессию с использованием частичных наименьших квадратов (PLSR), о чем свидетельствуют более высокие значения R^2 , более низкие баллы RMSE и лучшие значения относительной процентной разницы (RPD). Эти результаты подтверждают полезность нелинейных моделей для фиксации сложных взаимодействий почвы и окружающей среды в цифровом картировании почв (DSM). Последствия для управления земельными ресурсами очевидны: эффективные стратегии смягчения засоления должны быть нацелены на зоны высокого риска, такие как лагунные отложения и прибрежные равнины, посредством улучшения дренажа и мер по рекультивации почвы. Между тем более низкая засоленность в барьерных отмелях и современных лагунах способствует выращиванию солеустойчивых культур, таких как ячмень. Интегрируя геоморфологический анализ с результатами DSM, это исследование обеспечивает надежную основу для решения проблем засоления почвы, позволяя применять более обоснованные и устойчивые методы землепользования в прибрежных сельскохозяйственных системах.

Библиографический список

1. Abdullahi M. B., Elnaggar A. A., Omar M. M., Murtala A., Lawal M., Mosa A. A. Land degradation, causes, implications and sustainable management in arid and semi-arid regions: a case study of Egypt // *Egyptian Journal of Soil Science*. 2023. Vol. 63, No. 4. DOI: 10.21608/ejss.2023.230986.1647.
2. Aliev Z. H. Comprehensive approach of the decision existing problems of protection and stabilization of water and soil resources in Azerbaijan // *Journal of Emerging Trends in Economics and Management Sciences*. 2021. Vol. 12, No. 2. Pp. 65–68. DOI: 10.26717/BJSTR.2018.06.001358.
3. Bai Y., Wang G., Cheng Y., Shi P., Yang C., Yang H., Xu Z. Soil acidification in continuously cropped tobacco alters bacterial community structure and diversity via the accumulation of phenolic acids // *Scientific Reports*. 2019. Vol. 9. Article number 12499. DOI: 10.1038/s41598-019-48611-5.
4. Bunyatova L. N., Mammadova G. I., Hasanova T. A., Gahramanova A. Y., Akhundova S. M., Alakbarli G. Y. Main eco-properties of hazelnut (*Corylus avellana* L.) on the Sheki-Zagatala economic region // *International Journal of Advanced and Applied Sciences*. 2025. Vol. 14, No. 1. Pp. 209–216. DOI: 10.11591/ijaas.v14.i1.pp77-85.
5. FAO and UNEP. 2020. The state of the world's forests 2020. Forests, biodiversity and people. Rome, 2019. 214 p. DOI: 10.4060/ca8642en.
6. Ewing J., Oommen T., Jayakumar P., Alger R. Utilizing Hyperspectral Remote Sensing for Soil Gradation // *Remote Sensing*. 2020. Vol. 12, No. 20. 3312. DOI: 10.3390/rs12203312.
7. Гасанова Т. А. Агроэкология почв Гейчайского района Азербайджана // *Бюллетень науки и практики*. 2022. Т. 7, № 11. С. 132–137. DOI: 10.33619/2414-2948/72/16.
8. Mammadzada V. T., Aliyeva M. M., Rzayeva A. L., Nasirova A. I., Mammadova R. N. Soil bioactivity study through innovative approaches in Lankaran – Astara Region, Azerbaijan // *SABRAO Journal of Breeding and Genetics*. 2025. Vol. 57, No. 3. Pp. 1180–1191. DOI: 10.54910/sabrao2025.57.3.29.
9. Hasanova T., Mirzezadeh R., Asgarova G. Comprehensive studies of Greater Caucasus river valleys soils // *EUREKA: Life Sciences*, 2025. Vol. 1, No. 1. Pp. 11–18. DOI: 10.21303/2504-5695.2025.003654.
10. Hasanova T. A., Asgarova G. F. Soil studies of mountain-forest soils of the Lesser Caucasus // *Vestnik of the Belarusian State Agricultural Academy*. 2024. Vol. 1, No. 4. Pp. 32–37.

11. Hasanova T. A., Mammadova G. I., Asgarova G. F. Phytomass of gray-brown soils forming in arid ecosystem of Azerbaijan // *Bulletin of Science and Practice*. 2021. Vol. 7, No. 9. Pp. 110–115. DOI: 10.33619/2414-2948/70.
12. Hasanova T. A., Mammadova G. I., Bunyatova L. N., Gahramanova A. Y. Importance of biodiagnosics and irrigation grey-brown soils // *Universal Journal of Agricultural Research*. 2021. Vol. 9, No. 3. Pp. 63–69. DOI: 10.13189/ujar.2021.090301.
13. Ismayilova A. A., Shukurov S. Kh., Hasanaliyeva L. H., Osmanova S. F., Asgarova G. F., Hasanova T. A. Modern soil cover of natural cenoses and agrosenoses landscapes of the Kur-Araz plain // *Advances in Biology & Earth Sciences*. 2025. Vol. 10, No. 2. Pp. 314–325. DOI: 10.62476/abes.102314.
14. Macnunlu K., Hasanova Baba-zade R., Hasanova T. Ecological sustainability of agroecosystem and productivity assessment in the Barda area using NDVI and SAVI // *Advances in Biology & Earth Sciences*. Jomard publishing. 2025. Vol. 10, No. 1. Pp. 148–157. DOI: 10.62476/abes.101148.
15. Mammadzada V. T., Aliyeva M. M., Rzayeva A. L., Nasirova A. I., Mammadova R. N. Soil bioactivity study through innovative approaches in Lankaran – Astara Region, Azerbaijan // *SABRAO Journal of Breeding and Genetics*. 2025. Vol. 57, No. 3. Pp. 1180–1191. DOI: 10.54910/sabrao2025.57.3.29.
16. McBratney A. B., Santos M. M., Minasny B. On digital soil mapping // *Journal Geoderma*. 2003. Vol. 117, No. 1. Pp. 3–52.
17. Nasirova A. I., Aliyeva M. M., Mammadova R. N., Hasanova T. A. Bioecological edificators of gray-brown soils in Ganja-Gazakh massif (Azerbaijan) // *Environment and Ecology Research*, 2022. Vol. 10, No. 3. Pp. 392–397. DOI: 10.13189/eer.2022.100307.
18. Nelson M., Odeh I. Digital soil class mapping using legacy soil profile data: a comparison of a genetic algorithm and classification tree approach // *Soil Restoration*, 2019. Vol. 47, No. 6. Pp. 632–649.
19. Rowell D. L. *Soil science: methods & applications*. 1st edition. Longman Scientific & Technical; Wiley, Harlow publ. London, UK, 1999. 368 p. DOI: 10.4324/9781315844855.
20. Mercado-Blanco J., Abrantes I., Barra Caracciolo A., Bevivino A., Ciancio A., Grenni P., Hryniewicz K., Kredics L., Proença D. N. Belowground microbiota and the health of tree crops // *Frontiers in Microbiology*. 2018. Vol. 9. Article number 1006. DOI: 10.3389/fmicb.2018.01006.
21. Talibi S. M., Hasanova T. A. Environmentally significant indicators of mountain meadow soils in Azerbaijan // *Bulletin of Nizhnevartovsk State University*. 2022. Vol. 57, No. 1. Pp. 102–107. DOI: 10.36906/2311-4444/22-1/11.
22. Zhang Z., Ren J., Wang Y., & Zhou H. Study on the EC prediction of cracked soda saline-alkali soil based on texture analysis of high-resolution images from ground-based observation and machine learning methods // *Soil and Tillage Research*. 2024. Vol. 244. Article number 06234. DOI: 10.1016/j.still.2024.106234.

Об авторах:

Анара Ихтияровна Насирова, кандидат биологических наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории биологии почв, Институт почвоведения и агрохимии Министерства науки и образования Азербайджанской Республики, Баку, Азербайджанская Республика; ORCID 0009-0008-1916-3535.

E-mail: anara.nasirova@inbox.ru

Тюркан Аллахвердиевна Гасанова, кандидат аграрных наук, доцент, Бакинский государственный университет, Баку, Азербайджанская Республика; ORCID 0000-0002-5040-2599.

E-mail: turkanhesenova@mail.ru

Гюнель Фархадовна Аскерова, научный сотрудник лаборатории генезиса, географии и картографии почв, Институт почвоведения и агрохимии Министерства науки и образования Азербайджанской Республики, Баку, Азербайджанская Республика; ORCID 0009-0008-3598-1597. E-mail: asgerovagunel3@gmail.com

Назифа Алиевна Абасова, преподаватель кафедры физической географии, Бакинский государственный университет, Баку, Азербайджанская Республика; ORCID 0009-0005-9781-6472.

E-mail: asgarova.g@mail.ru

References

1. Abdullahi M. B., Elnaggar A. A., Omar M. M., Murtala A., Lawal M., Mosa A. A. Land degradation, causes, implications and sustainable management in arid and semi-arid regions: a case study of Egypt. *Egyptian Journal of Soil Science*. 2023; 63 (4). DOI: 10.21608/ejss.2023.230986.1647.
2. Aliev Z. H. Comprehensive approach of the decision existing problems of protection and stabilization of water and soil resources in Azerbaijan. *Journal of Emerging Trends in Economics and Management Sciences*. 2021; 12 (2): 65–68. DOI: 10.26717/BJSTR.2018.06.001358.
3. Bai Y., Wang G., Cheng Y., Shi P., Yang C., Yang H., Xu Z. Soil acidification in continuously cropped tobacco alters bacterial community structure and diversity via the accumulation of phenolic acids. *Scientific Reports*. 2019; 9: 12499. DOI: 10.1038/s41598-019-48611-5.

4. Bunyatova L. N., Mammadova G. I., Hasanova T. A., Gahramanova A. Y., Akhundova S. M., Alakbarli G. Y. Main eco-properties of hazelnut (*Corylus avellana* L.) on the Sheki-Zagatala economic region. *International Journal of Advanced and Applied Sciences*. 2025; 14 (1): 209–216. DOI: 10.11591/ijaas.v14.i1.pp77-85.
5. FAO and UNEP. 2020. The state of the world's forests 2020. Forests, biodiversity and people. Rome, 2019. 214 p. DOI: 10.4060/ca8642en.
6. Ewing J., Oommen T., Jayakumar P., Alger R. Utilizing Hyperspectral Remote Sensing for Soil Gradation. *Remote Sensing*. 2020; 12 (20): 3312. DOI: 10.3390/rs12203312.
7. Hasanova T. A. Agroecology of soils of Goychay district of Azerbaijan. *Bulletin of Science and Practice*. 2022; 7 (11): 132–137. DOI: 10.33619/2414-2948/72/16. (In Russ).
8. Mammadzada V. T., Aliyeva M. M., Rzayeva A. L., Nasirova A. I., Mammadova R. N. Soil bioactivity study through innovative approaches in Lankaran – Astara Region, Azerbaijan. *SABRAO Journal of Breeding and Genetics*. 2025; 57 (3): 1180–1191. DOI: 10.54910/sabrao2025.57.3.29.
9. Hasanova T., Mirzezadeh R., Asgarova G. Comprehensive studies of Greater Caucasus river valleys soils. *EUREKA: Life Sciences*. 202; 1 (1): 11–18. DOI: 10.21303/2504-5695.2025.003654.
10. Hasanova T. A., Asgarova G. F. Soil studies of mountain-forest soils of the Lesser Caucasus. *Vestnik of the Belarusian State Agricultural Academy*. 2024; 1 (4): 32–37.
11. Hasanova T. A., Mammadova G. I., Asgarova G. F. Phytomass of gray-brown soils forming in arid ecosystem of Azerbaijan. *Bulletin of Science and Practice*. 2021; 7 (9): 110–115. DOI: 10.33619/2414-2948/70.
12. Hasanova T. A., Mammadova G. I., Bunyatova L. N., Gahramanova A. Y. Importance of biodiagnostics and irrigation grey-brown soils. *Universal Journal of Agricultural Research*. 2021; 9 (3): 63–69. DOI: 10.13189/ujar.2021.090301.
13. Ismayilova A. A., Shukurov S. Kh., Hasanaliyeva L. H., Osmanova S. F., Asgarova G. F., Hasanova T. A. Modern soil cover of natural cenoses and agrosenoses landscapes of the Kur-Araz plain. *Advances in Biology & Earth Sciences*. 2025; 10 (2): 314–325. DOI: 10.62476/abes.102314.
14. Macnunlu K., Hasanova Baba-zade R., Hasanova T. Ecological sustainability of agroecosystem and productivity assessment in the Barda area using NDVI and SAVI. *Advances in Biology & Earth Sciences*. 2025; 10 (1): 148–157. DOI: 10.62476/abes.101148.
15. Mammadzada V. T., Aliyeva M. M., Rzayeva A. L., Nasirova A. I., Mammadova R. N. Soil bioactivity study through innovative approaches in Lankaran – Astara Region, Azerbaijan. *SABRAO Journal of Breeding and Genetics*. 2025; 57 (3): 1180–1191. DOI: 10.54910/sabrao2025.57.3.29.
16. McBratney A. B., Santos M. M., Minasny B. On digital soil mapping. *Journal Geoderma*. 2003; 117 (1): 3–52.
17. Nasirova A. I., Aliyeva M. M., Mammadova R. N., Hasanova T. A. Bioecological edificators of gray-brown soils in Ganja-Gazakh massif (Azerbaijan). *Environment and Ecology Research*. 2022; 10 (3): 392–397. DOI: 10.13189/eer. 2022.100307.
18. Nelson M., Odeh I. Digital soil class mapping using legacy soil profile data: a comparison of a genetic algorithm and classification tree approach. *Soil Restoration*. 2019; 47 (6): 632–649.
19. Rowell D. L. Soil science: methods & applications. 1st edition. Longman Scientific & Technical; Wiley, Harlow publ. London, UK, 1999. 368 p. DOI: 10.4324/9781315844855.
20. Mercado-Blanco J., Abrantes I., Barra Caracciolo A., Bevivino A., Ciancio A., Grenni P., Hryniewicz K., Kredics L., Proença D. N. Belowground microbiota and the health of tree crops. *Frontiers in Microbiology*. 2018; 9: 1006. DOI: 10.3389/fmicb.2018.01006.
21. Talibi S. M., Hasanova T. A. Environmentally significant indicators of mountain meadow soils in Azerbaijan. *Bulletin of Nizhnevartovsk State University*. 2022; 57 (1): 102–107. DOI: 10.36906/2311-4444/22-1/11.
22. Zhang Z., Ren J., Wang Y., Zhou H. Study on the EC prediction of cracked soda saline-alkali soil based on texture analysis of high-resolution images from ground-based observation and machine learning methods. *Soil and Tillage Research*. 2024; 244: 06234. DOI: 10.1016/j.still.2024.106234.

Authors' information:

Anara I. Nasirova, PhD in biology, associate professor, leading researcher at the soil biology laboratory, Institute of Soil Science and Agrochemistry of the Ministry of Science and Education of the Republic of Azerbaijan, Baku, Republic of Azerbaijan; ORCID 0009-0008-1916-3535. E-mail: anara.nasirova@inbox.ru

Turkan A. Hasanova, PhD in agrarian sciences, associate professor, Baku State University, Baku, Republic of Azerbaijan; ORCID 0000-0002-5040-2599. E-mail: turkanhesenova@mail.ru

Gunel F. Asgarova, researcher at the laboratory of soil genesis, geography and cartography, Institute of Soil Science and Agrochemistry of the Ministry of Science and Education of the Republic of Azerbaijan, Baku, Republic of Azerbaijan; ORCID 0009-0008-3598-1597. E-mail: asgerovagunel3@gmail.com

Nazifa A. Abasova, lecturer in the department of physical geography, Baku State University, Baku, Republic of Azerbaijan; ORCID 0009-0005-9781-6472. E-mail: asgarova.g@mail.ru