

ЗАСОЛЕНИЕ И МЕЛИОРАЦИЯ ПОЧВ

ГРНТИ 68.05.43; 68.01.77

DOI: 10.51886/1999-740X_2025_3_30

**Б.М. Амиров¹, С.О. Базарбаев¹, О.С. Жандыбаев^{1*}, М.Н. Пошанов¹,
О.С. Курманакын¹****МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАСОЛЕННОСТИ ПОЧВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
КОНДУКТОМЕТРИИ***¹Казахский научно-исследовательский институт почвоведения и агрохимии
имени У.У. Успанова, 050060, Алматы, пр. аль-Фараби, 75В, Казахстан,***e-mail: mr.orken@yandex.kz*

Аннотация. Засоленность почв остается одной из приоритетных проблем деградации земельных ресурсов, особенно в засушливых и орошаемых регионах Центральной Азии и юга Казахстана. В статье рассматривается возможность применения метода кондуктометрии как экспресс-способа оценки степени засоленности почв с использованием измерений электропроводности (ЕС) водной вытяжки. Работа выполнена на примере почв Шаульдерского массива Туркестанской области, характеризующихся различными уровнями солевой нагрузки. Полевые исследования включали отбор 76 почвенных образцов с разной глубины (до 1 м), подготовку вытяжек в соотношении почва:вода — 1:5 и измерение ЕС с использованием кондуктометра FieldScout Direct Soil EC Meter (CTS 50C). На основании полученных значений ЕС и содержания суммы солей была проведена классификация почв по степени засоленности в соответствии с международной классификацией Richards (1954) и FAO. Диапазон значений электропроводности составлял от 0,254 до 15,420 мСм/см, что охватывает спектр от незасоленных до сильно засоленных почв. Для количественного описания взаимосвязи между ЕС и содержанием растворимых солей построены и сравнены пять типов регрессионных моделей: линейная, логарифмическая, степенная, а также полиномиальные модели второй и третьей степени. Оценка точности проводилась с использованием коэффициента детерминации (R^2), среднеквадратической ошибки (MSE) и дисперсионного анализа (ANOVA). Наилучшие результаты показала полиномиальная модель третьей степени ($R^2=0,947$; MSE=0,034), обеспечивая наиболее точную аппроксимацию эмпирических данных. Линейная модель также продемонстрировала высокую точность ($R^2=0,904$; MSE=0,062), что позволяет оперативно использовать модель в прикладных задачах. Логарифмическая модель оказалась наименее информативной ($R^2=0,668$; MSE =0,215). Проведенный дисперсионный анализ подтвердил статистическую значимость влияния электропроводности на содержание солей ($p < 0,001$). Полученные результаты могут быть использованы для экспресс-диагностики засоленности, зонирования земель по степени пригодности для сельскохозяйственного использования, а также для планирования мелиоративных мероприятий. Метод кондуктометрии рекомендован к применению как в исследовательской, так и в производственной практике, включая дистанционный мониторинг с использованием ЕС-датчиков и ГИС-технологий.

Ключевые слова: засоленность почв, электропроводность, кондуктометрия, регрессионный анализ, математическое моделирование, экспресс-метод.

ВВЕДЕНИЕ

Засоление почв представляет собой серьезную экологическую и аграрную проблему, особенно актуальную в условиях водного дефицита, вторич-

ного засоления и недостаточной эффективности мелиоративной инфраструктуры. Согласно Глобальной карте засоленных почв (GSASmap), более 1,38 млрд га почв подвержены засо-

лению. Среди наиболее уязвимых регионов выделяются Австралия, Аргентина и Казахстан [1].

Основные климатические и антропогенные факторы способствуют как первичному, так и вторичному засолению почв. В условиях Центральной Азии и юга Казахстана это особенно актуально на фоне нарастающего водного дефицита, изменения климата и недостаточной эффективности ирригационно-дренажных систем [2].

Для устойчивого земледелия, особенно в мелиоративных зонах, важно быстро и точно оценивать степень засоленности. Перспективным методом является кондуктометрический анализ, позволяющий оперативно определять содержание солей по электропроводности почвенного раствора [3].

Традиционные методы диагностики засоленности являются трудоёмкими и затратными. В этих условиях особую актуальность приобретает кондуктометрический метод, основанный на определении электропроводности водной вытяжки (ЕС), отражающей общее содержание растворённых солей. Метод ЕС получил широкое распространение благодаря своей высокой чувствительности, простоте применения и применимости в полевых условиях [4, 5].

Согласно классификации Richards, почвы с $EC_e > 4$ мСм/см считаются засоленными [6]. При этом измерения ЕС можно проводить как в насыщенной пасте, так и в водной вытяжке (1:5), что технологически проще и адаптировано к полевым условиям [3, 4]. Водная вытяжка широко используется благодаря высокой корреляции между ЕС 1:5 и засоленностью [7]. Теоретические основы метода ЕС связаны с работами Hillel, где подчеркнута прямая зависимость электропроводности от концентрации, валентности и подвижности ионов, текстуры почвы и температуры [5]. Ayers и Westcot также отмечают

важность ЕС для контроля качества оросительной воды и управления солевым балансом [8]. Практические исследования, в том числе работы Kargas и Kerkides, подтвердили применимость ЕС для оценки общего солевого состава почв и вод [9]. Современные подходы к мониторингу засоления включают дистанционные и цифровые методы. Так, Shirokova и др. описывают комплексные системы наблюдения, сочетающие наземные ЕС-датчики и данные дистанционного зондирования [10]. Zhang и др. продемонстрировали высокую точность оценки засоления при совместном использовании спутниковых данных и наземных ЕС-измерений [11]. В условиях Центральной Азии и юга Казахстана проблема вторичного засоления обостряется из-за неэффективного водопользования и недостатка дренажной инфраструктуры. По данным И.А. Алиева это одна из ключевых причин деградации почв в регионе [12, 13]. М.С. Сейдахметов сообщает, что более 40% орошаемых земель Туркестанской области подвержены различным видам деградации, включая засоление [14]. Gharib и др. в своем исследовании подчеркивают, что метод ЕС обладает высокой чувствительностью к изменениям содержания солей и может применяться как на этапе первичной оценки, так и для контроля динамики засоленности в пространстве и времени. Их данные подтверждают применимость ЕС-карт и моделей в системах мониторинга сельскохозяйственных почв [15]. Исследования других ученых также выявили достоверную зависимость между электропроводностью и содержанием солей [16, 17]. Метод кондуктометрии — один из наиболее широко применяемых и доступных способов экспресс-оценки общего содержания растворимых солей в почвенном растворе. Он основан на измерении электропроводности (ЕС), которая прямо пропорциональна кон-

центрации растворенных ионов, таких как Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} и HCO_3^- . Как отмечают Власова и др., кондуктометрия позволяет получить результаты быстро и без использования реагентов, что делает ее незаменимой в полевых условиях [18].

Р.Р. Исмаилов и К.Ш. Абдрахманов предложили регрессионные модели для экспресс-оценки засоленности с коэффициентом детерминации $R^2 > 0,8$ [19]. Работы Mukhamedjanov и Toderich демонстрируют успешное использование спутниковых данных и картографирования засоленных почв в регионе [20].

Анализ научной литературы показывает, что метод электропроводности (ЕС) является универсальным, доступным и информативным инструментом диагностики засоленности почв. В условиях Казахстана и Центральной Азии метод получил широкое распространение благодаря своей применимости в полевых условиях и высокой корреляции с содержанием солей. Его эффективность возрастает при использовании математического моделирования и дистанционного зондирования. В будущем интеграция ЕС с цифровыми ГИС-системами и сенсорными технологиями может стать основой устойчивого мониторинга засоленных земель в аридных регионах мира.

Многочисленные исследования подтверждают наличие тесной корреляционной связи между ЕС и содержанием растворенных солей в почве. В частности, Xu et al. показали, что между ЕС и уровнем засоленности существует устойчивая зависимость при различных уровнях влажности, а точность моделей может быть улучшена при использовании полиномиальных, степенных и экспоненциальных функций [17]. Gupta & Abrol обосновали возможность использования ЕС в качестве индикатора солевой нагрузки при разработке мелиоративных мероприятий [21]. Keren & Miyamoto подчеркивают значимость ЕС

для оценки мелиоративного состояния почв при повторном использовании дренажных вод и обосновании доз промывки. Авторы подчеркивают важность локальной калибровки моделей ЕС – засоленность, особенно в условиях высокой текстурной неоднородности [22].

Несмотря на наличие зарубежных классификаций, они не учитывают текстурные, химические характеристики почв и климатические особенности юга Казахстана. В этой связи актуальной является задача локальной калибровки зависимости между ЕС и содержанием растворимых солей для условий региона.

Цель исследования: построение и валидация математических моделей для оценки засоленности сероземных почв на основе электропроводности водной вытяжки и обоснование их применимости для агрономической практики.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследование проводилось на территории Шаульдерского массива (Туркестанская область, Казахстан), характеризующегося преобладанием сероземных почв. Участки подбирались с учетом разной степени засоленности. Почвы имеют средне- и тяжелосуглинистый гранулометрический состав, содержание гумуса менее 1 %, уровень рН — слабощелочной. Диапазон колебаний величины электропроводностей почвенных вытяжек составлял от 0,2 до 15,4 мСм/см, что характеризует широкую амплитуду засоленности почв – от незасоленных до сильнозасоленных по классификации USDA [6].

Было отобрано 76 образцов с глубины до 1 м. Водные вытяжки готовились в соотношении 1:5. Электропроводность раствора измерялась прибором FieldScout Direct Soil EC Meter (CTS 50C), откалиброванным на растворе NaCl. Содержание суммы солей определялось по ГОСТ 26423–85 – 26428–85.

Для описания зависимости между ЕС и содержанием солей были построены регрессионные модели: линейная, логарифмическая, степенная, полиномиальная 2-й и 3-й степени. Оценка качества моделей проводилась по коэффициенту детерминации (R^2), среднеквадратической ошибке (MSE) и с использованием дисперсионного анализа (ANOVA).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

По результатам измерений почвенных проб, значения ЕС варьировали от 0,254 до 15,420 мСм/см, а содержание солей — от 0,077 до 4,518%.

Корреляционный анализ показал тесную положительную связь между ЕС и суммой солей ($r = 0,951$).

Наилучшую аппроксимацию обеспечила полиномиальная модель 3-й степени ($R^2=0,947$; $MSE=0,034$), что свидетельствует о выраженной нелинейной зависимости между показателями. Линейная модель также показала высокую точность ($R^2=0,904$), но уступила полиномиальной по уровню погрешности.

Результаты измерения электропроводности и суммы солей почвенных проб приведены в таблице 1.

Таблица 1 - Результаты измерения электропроводности и суммы солей почвенных проб

Но- мер про- бы	Показание кондук- тометра (мСм/см) при 4-25 °С	Сум- ма со- лей, %	Но- мер про- бы	Показание кондук- тометра (мСм/см) при 4-25 °С	Сум- ма со- лей, %	Но- мер про- бы	Показание кондук- тометра (мСм/см) при 4-25 °С	Сум- ма со- лей, %
1	0,307	0,077	27	0,524	0,180	51	3,520	0,798
2	0,566	0,085	28	0,377	0,182	52	4,050	0,861
3	0,326	0,086	27	0,524	0,180	53	3,830	0,878
4	0,353	0,088	28	0,377	0,182	54	3,480	0,932
5	0,634	0,089	29	1,060	0,186	55	3,740	0,957
6	0,254	0,095	30	1,034	0,197	56	3,440	0,957
7	0,639	0,095	31	0,923	0,199	57	3,473	0,965
8	0,300	0,098	32	0,744	0,203	58	3,340	0,965
9	0,475	0,099	33	0,664	0,207	59	4,990	1,024
10	0,372	0,099	34	1,073	0,208	60	4,030	1,117
11	0,386	0,102	35	1,531	0,209	61	6,110	1,122
12	0,669	0,105	36	0,463	0,211	62	6,400	1,208
13	0,455	0,105	37	0,739	0,239	63	6,780	1,243
14	0,316	0,107	38	0,701	0,278	64	6,000	1,253
15	0,737	0,109	39	1,623	0,322	65	9,550	1,396
16	0,734	0,113	40	1,815	0,345	66	7,150	1,499
17	0,374	0,121	41	1,672	0,358	67	7,800	1,502
18	0,701	0,123	42	1,593	0,361	68	5,380	1,506
19	0,418	0,124	43	1,716	0,413	69	7,320	1,661
20	0,368	0,128	44	2,120	0,519	70	7,030	1,704
21	0,538	0,142	45	1,895	0,589	71	7,500	1,728
22	0,603	0,155	46	4,190	0,618	72	10,040	1,744
23	1,116	0,161	47	2,700	0,652	73	10,000	1,784
24	0,667	0,164	48	0,456	0,659	74	6,980	1,931
25	0,838	0,170	49	1,628	0,683	75	13,300	4,196
26	0,664	0,170	50	2,810	0,722	76	15,420	4,518

Анализ показывает четкую положительную корреляцию между электропроводностью и суммой солей (рисунок 1). Зависимость между электропроводностью водной вытяжки и содержанием растворимых солей характеризуется четко выраженной положительной корреляцией ($R=,951$), при которой с увеличением электропроводности возрастает и концентрация солей, что подтверждает целесообразность применения метода кондуктометрии в качестве экспресс-оценки степени засоленности почвы. В диапазоне проб от первой до сороковой наблюдаются низкие значения как электропроводности, так и содержания солей, что свидетельствует о незасоленных или слабозасоленных почвах при этом линии зависимости практически совпадают, указывая на устойчивую взаимосвязь между этими показателями. В промежутке от сорок первой до шестидесятой пробы фиксируется постепенный рост значений с заметными колебаниями электропроводности относительно содержания солей что может быть обусловлено преобладанием отдельных ионов, обладающих высокой удельной проводимостью, таких как натрий или хлориды при неизменной массе солей. Начиная с

шестидесятой и до семьдесят шестой пробы наблюдается резкое увеличение как электропроводности, так и суммарного содержания солей, особенно отчетливо выраженное в кривой электропроводности, что свидетельствует о наличии сильно засоленных почв возможно с токсичной концентрацией солей угрожающей урожайности сельскохозяйственных культур. Максимальные значения электропроводности достигают порядка шестнадцати миллисиemens на сантиметр, что превышает порог солеустойчивости большинства возделываемых растений.

Таким образом, между электропроводностью и содержанием растворимых солей устанавливается сильная нелинейная положительная зависимость, позволяющая использовать метод кондуктометрии как эффективный инструмент для экспресс-оценки засоленности почвы, тогда как для более точного количественного анализа рекомендуется построение регрессионной модели с учетом типа почвы ионного состава и температурных корректировок.

Предложено условное ранжирование исследованных почв по степени засоленности на основе ЕС водной вытяжки (таблица 2).

Таблица 2 - Классификация почв по степени засоленности на водной вытяжке 1:5

Условный диапазон ЕС, мСм/см	Характеристика почвы
< 1	Незасоленная
1,0-2,0	Слабозасоленная
2,0 - 4,0	Среднезасоленная
4,0-8,0	Сильнозасоленная
> 8	Очень сильнозасоленная

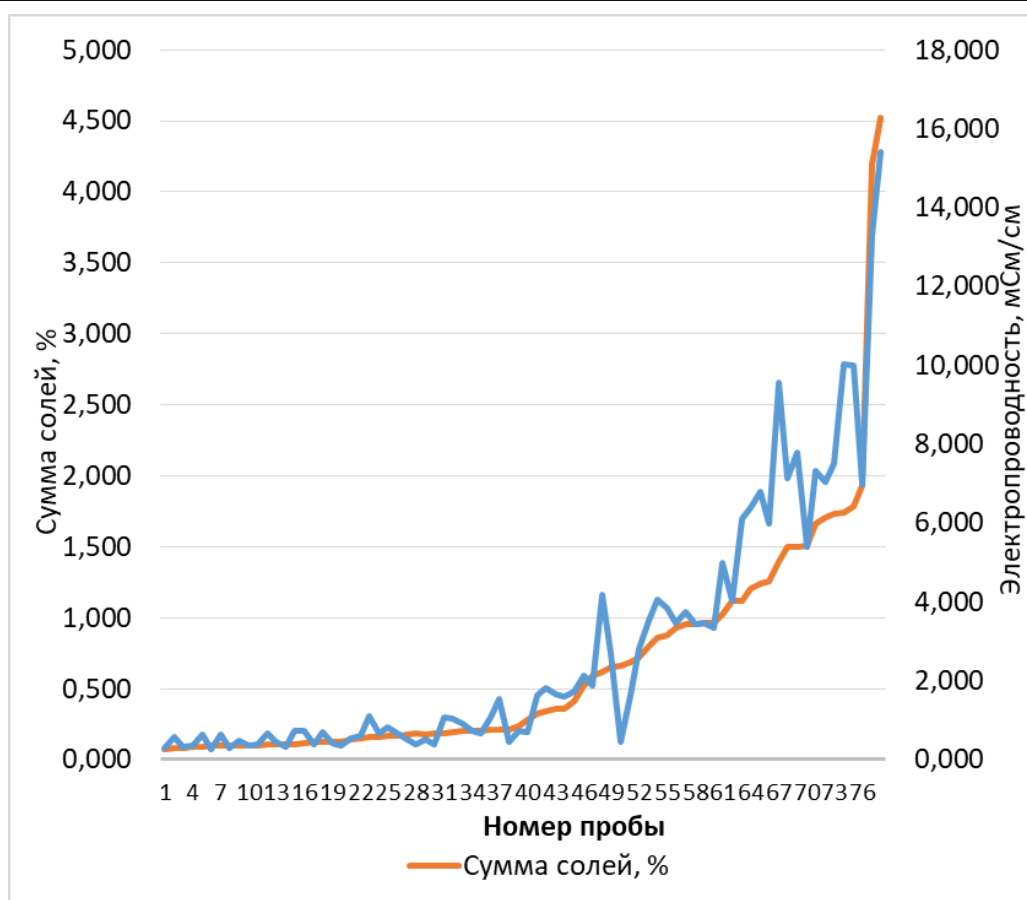


Рисунок 1 – График соответствия между содержанием растворимых солей и электропроводностью почвенного раствора

Анализ диапазонов значений электропроводности позволил выделить пять основных уровней засоленности почв:

Незасоленные почвы (ЕС < 1 мСм/см) - характеризуются отсутствием признаков накопления солей, обладают благоприятными агрохимическими свойствами. К данной категории отнесены пробы № 1–30, что составляет основную часть выборки, свидетельствуя о преобладании пригодных для земледелия участков.

Слабозасоленные почвы (ЕС от 1 до 2 мСм/см) — содержат незначительное количество растворимых солей, что может оказывать влияние на рост чувствительных к засолению культур, однако в целом остаются ограниченно

пригодными для сельскохозяйственного использования. К этой группе отнесены пробы № 31-45.

Среднезасоленные почвы (ЕС от 2 до 4 мСм/см) — указывают на наличие выраженного засоления, которое может существенно ограничивать продуктивность сельскохозяйственных культур без предварительных мелиоративных мероприятий. В выборке к данной категории относятся пробы № 46-52.

Сильнозасоленные почвы (ЕС от 4 до 8 мСм/см) — содержат высокие концентрации солей, неблагоприятные для большинства растений. Такие почвы требуют комплексного восстановления и рассматриваются как малопригодные для земледелия. К этой группе отнесены пробы № 52–70.

Очень сильнозасоленные почвы (ЕС > 8 мСм/см) — содержат очень высокие концентрации солей, токсичные для растений. Такие почвы требуют кардинального восстановления и рассматриваются как непригодные для земледелия. К этой группе отнесены пробы № 71–76.

Представленная классификация учитывает локальные особенности солевого состава и текстуры почв и может служить основой для дифференцированной агротехнической оценки и зонирования.

В наших исследованиях максимальное зарегистрированное значение электропроводности составило 15,42 мСм/см (проба № 76), что соответствует содержанию солей на уровне 4,518 %. Это указывает на очень высокую степень засоленности, характерную для солонцов или солончаков, подверженных переувлажнению. Кроме того, пробы №72, №73 и №75 демонстрируют резкий рост значений ЕС, что может свидетельствовать о

наличии локального очага вторичного засоления, обусловленного нарушением водно-солевого баланса.

Полученные данные легли в основу построения регрессионных моделей, отражающих количественную зависимость между электропроводностью почвенного раствора и общей концентрацией солей. Такие модели могут быть использованы для оперативной оценки степени засоленности и зонирования почвенных участков по степени пригодности для сельскохозяйственного использования.

Метод особенно полезен для базовой классификации почв по степени засоленности в полевых условиях, позволяя ускорить диагностику и планирование мелиорации.

В целях прогнозирования содержания солей в почве по данным электропроводности (ЕС) были построены математические модели: линейная, полиномиальная (2-й и 3-й степени), логарифмическая и степенная (таблица 3).

Таблица 3 - Оценка качества различных регрессионных моделей для зависимости между электропроводностью (ЕС) и суммой солей (%)

Модель	Формула	R ²	MSE
Линейная	$y = 0,2361x - 0,0031$	0,904	0,062
Логарифмическая	$y = 0,5713\ln(x) + 0,438$	0,668	0,215
Степенная	$y = 0,2536x^{0,9063}$	0,903	0,083
Полиномиальная 2-й степени	$y = 0,0089x^2 + 0,1375x + 0,1109$	0,929	0,046
Полиномиальная 3-й степени	$y = 0,002x^3 - 0,0331x^2 + 0,3409x - 0,0298$	0,947	0,034

Проведенные математические анализы показали, что наиболее точной оказалась полиномиальная модель 3-й степени, при этом линейная модель показала хорошие результаты и может быть использована для упрощенной

интерпретации, тогда как логарифмическая модель значительно уступает по качеству. Дисперсионный анализ показал статистическую значимость моделей ($F=718,2$; $p < 0,001$) (таблица 4).

Таблица 4 - Результаты дисперсионного анализа (ANOVA)

Источник вариации	Сумма квадратов	Степени свободы	F-критерий	p-значение
ЕС (эл. проводимость)	45.72	1	718.23	1.8×10^{-40}
Остатки	4.84	76	—	—

Для каждого вида модели были построены графики зависимости содержания солей от электропроводности. На рисунках 2-6 приведено сравнение эмпирических точек и линий регрессии для различных моделей.

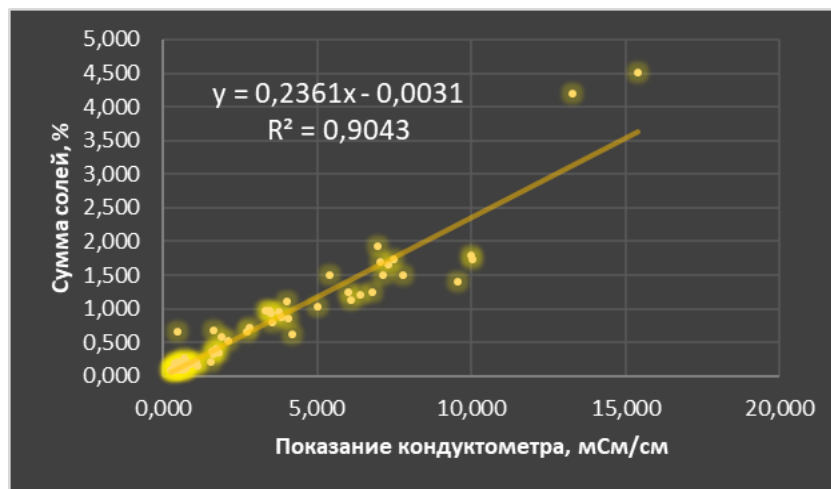


Рисунок 2 – Линейная модель зависимости содержания солей от электропроводности (ЕС) почвы

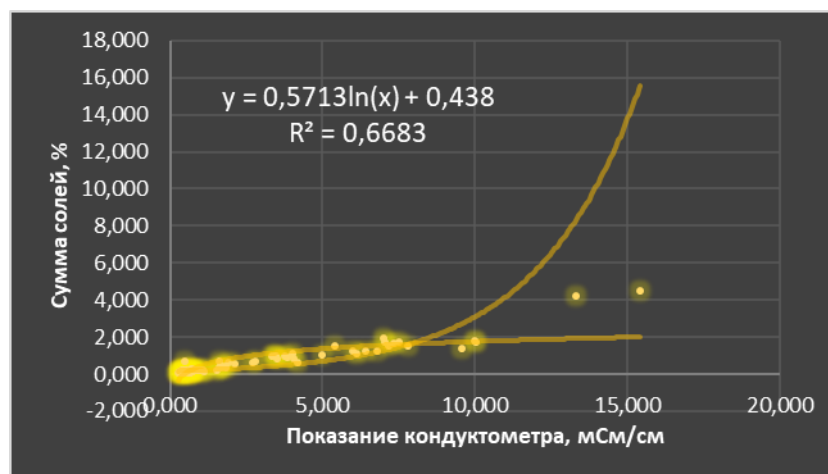


Рисунок 3 – Логарифмическая модель зависимости содержания солей от электропроводности (ЕС) почвы

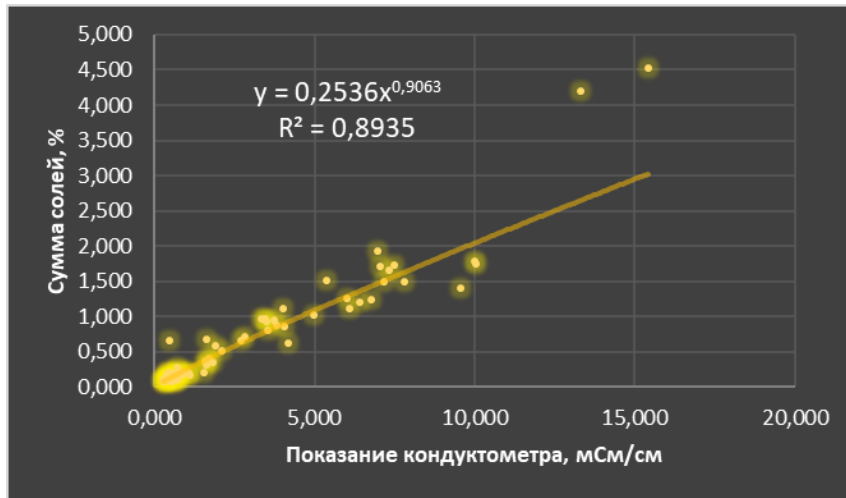


Рисунок 4 – Степенная модель зависимости содержания солей от электропроводности (ЕС) почвы

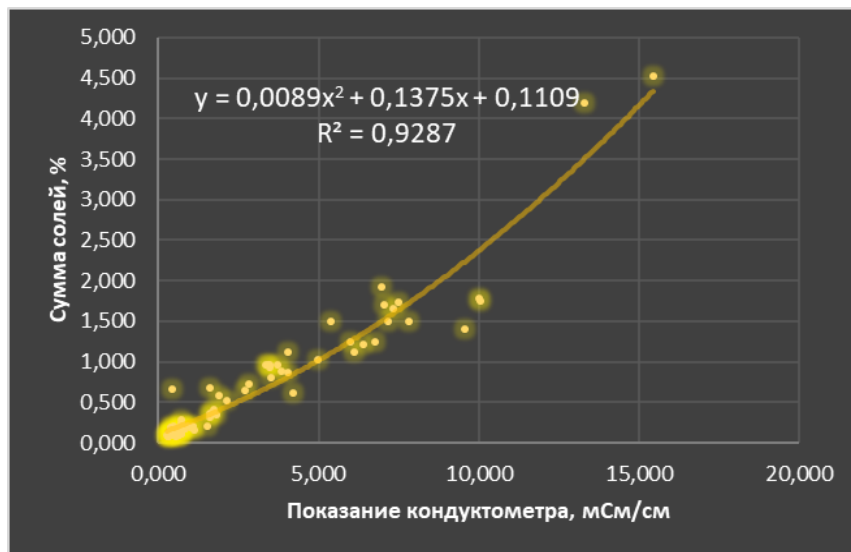


Рисунок 5 – Полиномиальная модель 2-й степени зависимости содержания солей от электропроводности (ЕС) почвы

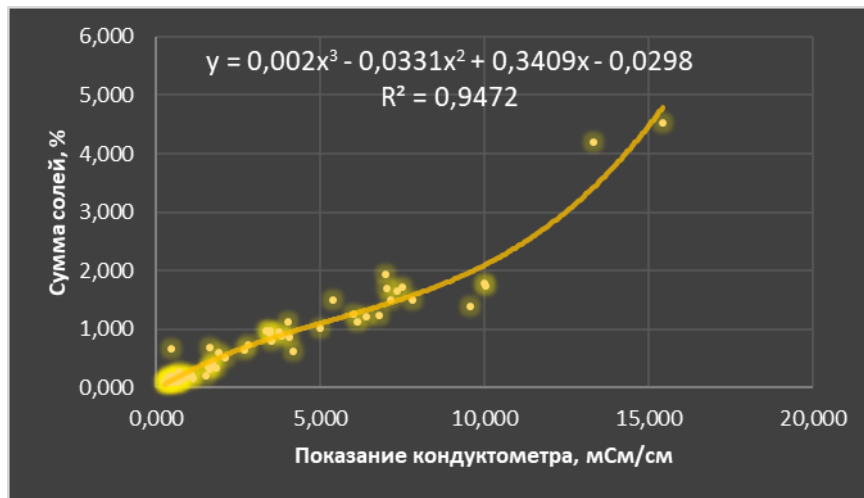


Рисунок 6 – Полиномиальная модель 3-й степени зависимости содержания солей от электропроводности (ЕС) почвы

Сравнительный анализ показал, что наилучшее качество аппроксимации демонстрирует полиномиальная модель третьей степени, обладающая наивысшим коэффициентом детерминации ($R^2=0,947$) и наименьшей среднеквадратичной ошибкой ($MSE=0,034$). Линейная модель также показала высокую точность ($R^2=0,904$, $MSE=0,062$) и может использоваться в случае необходимости упрощения вычислений. Логарифмическая модель показала сравнительно низкие значения коэффициента детерминации ($R^2=0,668$, $MSE=0,215$), что свидетельствует об их ненадежности в рассматриваемых условиях.

Полученные результаты подтверждают выводы других авторов [23-25], что полиномиальные модели лучше описывают зависимость ЕС от содержания солей на слабо- и умеренно засоленных почвах, чем линейные или логарифмические зависимости.

Таким образом, впервые проведена локальная калибровка зависимости между электропроводностью (ЕС) и содержанием растворимых солей для сероземных почв юга Казахстана.

Установлена целесообразность применения полиномиальной модели

третьей степени для описания данной зависимости, что обеспечивает более высокую точность прогноза, чем традиционные линейные и логарифмические модели.

Предложена модифицированная шкала градации засоленности почв по ЕС, адаптированная к региональным агроэкологическим условиям.

Полученные зависимости могут быть использованы для экспресс-оценки, дистанционного мониторинга и мелиоративного планирования, включая применение в ГИС-системах.

ВЫВОДЫ

Метод кондуктометрии подтвердил свою эффективность в оценке содержания растворимых солей в сероземных почвах юга Казахстана. Наиболее точной оказалась полиномиальная модель 3-й степени. Полученные данные позволяют рекомендовать метод для экспресс-оценки, пространственного зонирования и мелиоративного прогнозирования.

Рекомендуется использование модели в сочетании с дистанционным зондированием и ГИС-анализом для комплексного мониторинга деградации почв.

Работа выполнена в рамках научно-практического сопровождения субъектов АПК по внедрению в деятельность разработанного бизнес-проекта по договору №29 от 2025-04-13 «Инновационная агротехнология повышения урожайности кукурузы на засоленных почвах Туркестанской области через улучшение почвенного плодородия и оптимизацию питания в условиях ведения устойчивого земледелия».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Global map of salt-affected soils [Электронный ресурс]: FAO Soils Portal. – Режим доступа: <https://www.fao.org/soils-portal/data-hub/soil-maps-and-databases/global-map-of-salt-affected-soils/ar/>, свободный.
2. FAO. Global status of salt-affected soils – Main report. – Rome, 2024. – 148 с.
3. Rhoades J.D., Kandiah A., Mashali A.M. The use of saline waters for crop production. – Rome: FAO, 1992. – 133 p.
4. Corwin D.L., Lesch S.M. Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture// Computers and Electronics in Agriculture. – 2005. – Vol. 46, Issue 1–3. – P. 11–43.
5. Hillel, D. Introduction to Environmental Soil Physics. – Amsterdam: Elsevier Academic Press, 2004. – 494 p.
6. Richards, L.A. Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils// USDA Agriculture Handbook. – Washington, DC: U.S. Government Printing Office, 1954. - № 60. – 160 p.
7. Slavich P.G., Petterson G.H. Estimating the electrical conductivity of saturated paste extracts from 1:5 soil: water suspensions and texture// Australian Journal of Soil Research. – 1990. – Vol. 28. – P. 453–463.
8. Ayers, R.S., Westcot, D.W. Water Quality for Agriculture// FAO Irrigation and Drainage Paper. – Rome: FAO, 1985. – № 29. – 174 p.
9. Kargas G., Kerkides P. Electrical conductivity and total dissolved solids in irrigation water in relation to soil properties// Agricultural Water Management. - 2008. - Vol. 95, № 5. - P. 603–612.
10. Shirokova, Y.I., Forkutsa, I., Sharipova, S.S. et al. Soil salinization in Central Asia: Monitoring approaches and problems// Sustainability. – 2021. – Vol. 13, Issue 11. – P. 6146.
11. Zhang M., Liu Z., Zhang Z. et al. Mapping soil salinity using remote sensing and soil characteristics: A case study in the Bosten Lake watershed, China// Geoderma. – 2018. – Vol. 311. – P. 1–12.
12. Алиев И. А. Засоление почв юга Казахстана и пути их мелиорации. Вестник КазНАУ. - 2016. - № 2. - С. 25–32.
13. Алиев, И.А. Состояние и использование орошаемых земель Южного Казахстана// Агроөнөркәсіп кешені Қазақстанда. – 2016. – № 3 (55). – С. 22–26.
14. Сейдахметов М.С. Анализ состояния засоленных почв Туркестанской области// Почвоведение и агрохимия. - 2019. - № 4. - С. 14–19.
15. Gharib S., Naseri A., Ashraf S. Evaluation of Soil Salinity Mapping Based on Electrical Conductivity// Soil & Tillage Research - 2019. - V. 189. - P. 129–136.
16. Жумабеков, Ж.К., Абдраманова, А.А. Использование электропроводности при оценке засоленности почв// Аграрная наука Евразии. – 2021. – Т. 11, № 3 (39). – С. 49–53.

17. Xu, X., Wang, J., & Deng, L. (2014). Relationships between soil salinity and electrical conductivity under different moisture conditions// *Environmental Monitoring and Assessment*. – 2014. – Vol. 186, № 6. – P. 3451–3460.
18. Власова, Н.А., Иванова, Л.А., Широкова, Л.В. Электропроводность почвенного раствора как показатель засоленности// *Почвоведение*. – 2007. – №3. – С. 84–89.
19. Исмаилов, Р.Р., Абдрахманов, К.Ш. Применение экспресс-методов для определения засоленности почв// *Почвоведение и агрохимия*. – 2020. – № 2(74). – С. 55–61.
20. Mukhamedjanov, H.K., Toderich, K.N. Monitoring of soil salinization using GIS and remote sensing in Central Asia// *Environmental Earth Sciences*. – 2015. – Vol. 74. – P. 4539–4547.
21. Gupta R.K., Abrol I.P. Salt-affected soils: Their reclamation and management for crop production// *Journal of Advances in Soil Science*. – 1990. – Vol. 11. – P. 223–288.
22. Keren R., Miyamoto S. Reclamation of saline and sodic soils // *Advances in Agronomy*. – 2012. – Vol. 115. – P. 325–380.
23. Мельников П.В., Сатпаев А.Н. Оценка засоления почв по электропроводности водных вытяжек// *Вестник аграрной науки*. – 2020. – № 6. – С. 64–69.
24. Zaman M. et al. Soil salinity monitoring approaches using EC measurements// *Journal of Environmental Management*. – 2019. – Vol. 236. – P. 90–99.
25. Панова С.В. Оценка экспресс-методов для диагностики солевого загрязнения почв// *Агрохимия*. – 2017. – № 11. – С. 48–55.

REFERENCES

1. Global map of salt-affected soils [Elektronnyy resurs]: FAO Soils Portal. – Rezhim dostupa: <https://www.fao.org/soils-portal/data-hub/soil-maps-and-databases/global-map-of-salt-affected-soils/ar/>, svobodny.
2. FAO. Global status of salt-affected soils – Main report. – Rome, 2024. – 148 с.
3. Rhoades J.D., Kandiah A., Mashali A.M. The use of saline waters for crop production. – Rome: FAO, 1992. – 133 p.
4. Corwin D.L., Lesch S.M. Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture// *Computers and Electronics in Agriculture*. – 2005. – Vol. 46, Issue 1–3. – P. 11–43.
5. Hillel, D. Introduction to Environmental Soil Physics. – Amsterdam: Elsevier Academic Press, 2004. – 494 p.
6. Richards, L.A. Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils// *USDA Agriculture Handbook*. – Washington, DC: U.S. Government Printing Office, 1954. - № 60. – 160 p.
7. Slavich P.G., Petterson G.H. Estimating the electrical conductivity of saturated paste extracts from 1:5 soil:water suspensions and texture// *Australian Journal of Soil Research*. – 1990. – Vol. 28. – P. 453–463.
8. Ayers, R.S., Westcot, D.W. Water Quality for Agriculture// *FAO Irrigation and Drainage Paper*. – Rome: FAO, 1985. – № 29. – 174 p.
9. Kargas G., Kerkides P. Electrical conductivity and total dissolved solids in irrigation water in relation to soil properties// *Agricultural Water Management*. - 2008. - Vol. 95, № 5. - P. 603–612.

10. Shirokova, Y.I., Forkutsa, I., Sharipova, S.S. et al. Soil salinization in Central Asia: Monitoring approaches and problems// Sustainability. – 2021. – Vol. 13, Issue 11. – P. 6146.
11. Zhang M., Liu Z., Zhang Z. et al. Mapping soil salinity using remote sensing and soil characteristics: A case study in the Bosten Lake watershed, China// Geoderma. – 2018. – Vol. 311. – P. 1–12.
12. Aliyev I. A. Zasoleniye pochv yuga Kazakhstana i puti ikh melioratsii. Vestnik KazNAU. - 2016. - № 2. - С. 25–32.
13. Aliyev, I.A. Sostoyaniye i ispolzovaniye oroshayemykh zemel Yuzhnogo Kazakhstana// Agroenerkәsip kesheni Қазақстанда. – 2016. – № 3 (55). – С. 22–26.
14. Seydakhmetov M.S. Analiz sostoyaniya zasolennykh pochv Turkestanskoy oblasti// Pochvovedeniye i agrokimiya. - 2019. - № 4. - С. 14–19.
15. Gharib S., Naseri A., Ashraf S. Evaluation of Soil Salinity Mapping Based on Electrical Conductivity// Soil & Tillage Researchyu - 2019. - V. 189. - P. 129–136.
16. Zhumabekov, Zh.K., Abdramanova, A.A. Ispolzovaniye elektroprovodnosti pri otsenke zasolennosti pochv// Agrarnaya nauka Yevrazii. – 2021. – T.11, №3(39). – С. 49–53.
17. Xu, X., Wang, J., & Deng, L. (2014). Relationships between soil salinity and electrical conductivity under different moisture conditions// Environmental Monitoring and Assessment. – 2014. – Vol. 186, № 6. – P. 3451–3460.
18. Vlasova, N.A., Ivanova, L.A., Shirokova, L.V. Elektroprovodnost pochvennogo rastvora kak pokazatel zasolennosti// Pochvovedeniye. – 2007. – №3. – С. 84–89.
19. Ismailov, R.R., Abdrakhmanov, K.Sh. Primeneniye ekspress-metodov dlya opredeleniya zasolennosti pochv// Pochvovedeniye i agrokimiya. – 2020. – № 2(74). – С. 55–61.
20. Mukhamedjanov, H.K., Toderich, K.N. Monitoring of soil salinization using GIS and remote sensing in Central Asia// Environmental Earth Sciences. – 2015. – Vol. 74. – P. 4539–4547.
21. Gupta R.K., Abrol I.P. Salt-affected soils: Their reclamation and management for crop production// Journal of Advances in Soil Science. – 1990. – Vol. 11. – P. 223–288.
22. Keren R., Miyamoto S. Reclamation of saline and sodic soils // Advances in Agronomy. – 2012. – Vol. 115. – P. 325–380.
23. Melnikov P.V., Satpayev A.N. Otsenka zasoleniya pochv po elektroprovodnosti vodnykh vytyazhek// Vestnik agrarnoy nauki. – 2020. – №6. – С. 64–69.
24. Zaman M. et al. Soil salinity monitoring approaches using EC measurements// Journal of Environmental Management. – 2019. – Vol. 236. – P. 90–99.
25. Panova S.V. Otsenka ekspress-metodov dlya diagnostiki solevogo zagryazneniya pochv// Agrokimiya. – 2017. – № 11. – С. 48–55.

ТҮЙІН

Б.М. Амиров¹, С.О. Базарбаев¹, О.С. Жандыбаев^{1*}, М.Н. Пошанов¹,О.С. Құрманакын¹

КОНДУКТОМЕТРИЯ ӘДІСІМЕН ТОПЫРАҚТЫҢ ТҮЗДАНУЫН МОДЕЛЬДЕУ

¹*Ө.О. Оспанов атындағы Қазақ топырақтану және агрохимия ғылыми-зерттеу институты, 050060, Алматы., әл-Фараби даңғылы, 75В, Қазақстан,***e-mail: mr.orken@yandex.kz*

Топырақтың тұздануы – жер ресурстарының тозуының басты мәселелерінің бірі, әсіресе Орталық Азия мен Қазақстанның оңтүстігіндегі құрғақ және суармалы аймақтарда. Бұл зерттеуде топырақтың тұздану деңгейін су ерітіндісінің электрөткізгіштігін (ЕС) өлшеу негізінде экспресс-бағалау үшін кондуктометрия әдісін қолдану мүмкіндігі қарастырылады. Зерттеу нысаны ретінде Түркістан облысының Шаульдер алабындағы әртүрлі тұз жүктемесімен сипатталатын сұр топырақтар таңдалды. Тереңдігі 1 метрге дейінгі 76 топырақ үлгісі алынып, топырақ:су қатынасы 1:5 болатын су ерітінділері дайындалды. Өлшеулер FieldScout Direct Soil EC Meter (CTS 50C) калибрленген құрылғысы арқылы жүргізілді. Алынған мәліметтер негізінде Richards (1954) және FAO халықаралық жіктемелеріне сәйкес топырақтардың тұздану деңгейі бойынша саралау жүргізілді. ЕС мәндері 0,254-тен 15,420 мСм/см аралығында өзгеріп, тұзсыздан жоғары тұзданған топырақтарға дейінгі диапазонды қамтыды. Бес түрлі регрессиялық модельдер (сызықтық, логарифмдік, дәрежелік, екінші және үшінші дәрежелі полиномиалдық) салыстырылды. Ең жоғары дәлдік үшінші дәрежелі полиномиалдық модельмен анықталды ($R^2 = 0,947$; $MSE = 0,034$). ANOVA талдауы ЕС мен тұз мөлшері арасындағы байланыстың статистикалық мәнділігін растады ($p < 0,001$). Алынған модельдер тұздануды жедел анықтау, топырақты аймақтарға бөлу және мелиорациялық жоспарлау үшін қолданыла алады.

Түйінді сөздер: топырақ тұздануы, электрөткізгіштік, кондуктометрия, регрессиялық талдау, математикалық модельдеу, экспресс-әдіс.

SUMMARY

B.M. Amirov¹, S.O. Bazarbayev¹, O.S. Zhandybayev^{1*}, M.N. Poshanov¹,O.S. Kurmanakyn¹

MODELING SOIL SALINITY USING CONDUCTOMETRY

¹*Kazakh Research Institute of Soil Science and Agrochemistry named after U.U. Usmanov, 050060, Almaty, al-Farabi ave., 75B, Kazakhstan***e-mail: mr.orken@yandex.kz*

Soil salinity is one of the key issues contributing to land degradation, particularly in arid and irrigated regions of Central Asia and southern Kazakhstan. This study explores the applicability of the conductometric method as a rapid tool for assessing soil salinity levels based on electrical conductivity (EC) measurements of a water extract. The research focused on sierozem soils from the Shoulder massif in the Turkistan region, which are characterized by varying degrees of salt accumulation. A total of 76 soil samples were collected from depths up to 1 meter, and water extracts were prepared in a 1:5 soil-to-water ratio. Measurements were carried out using a calibrated FieldScout Direct Soil EC Meter (CTS 50C). Based on the obtained data, soil salinity classification was performed according to the international standards by Richards (1954) and FAO. EC values ranged from 0.254 to 15.420 mS/cm, covering the spectrum from non-saline to highly saline soils. Five types of regression models were developed and compared: linear, logarithmic, power, second-degree polynomial, and third-degree polynomial. The third-degree polynomial model demonstrated the highest accuracy ($R^2 = 0.947$; $MSE = 0.034$). ANOVA confirmed the statistical significance of the influence of EC on salt content ($p < 0.001$). The resulting models can be applied for rapid salinity diagnostics, soil zoning, and reclamation planning.

Keywords: soil salinity, electrical conductivity, conductometry, regression analysis, mathematical modeling, rapid assessment method.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

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

2. Базарбаев Султан Оразбаевич – младший научный сотрудник отдела агрохимии, PhD, ORCID ID: <https://orcid.org//0009-0000-8786-3738>, e-mail: sultan-13_01@mail.ru,

3. Жандыбаев Оркен Серпинулы – младший научный сотрудник отдела агрохимии, магистр сельскохозяйственных наук, ORCID ID: <https://orcid.org//0000-0002-8544-8992>, e-mail: mr.orken@yandex.kz

4. Пошанов Максат Нурбаевич - заведующий отделом мелиорации засоленных почв, PhD, ORCID ID: <https://orcid.org//0000-0002-0180-5359>, e-mail: maksat_90.okkz@mail.ru

5. Құрманәқын Олжас Серікұлы – инженер-аналитик отдела агрохимии, ORCID ID: <https://orcid.org//0009-0002-2810-2124>, e-mail: k.oljas.s@mail.ru,