АРИДНЫЕ ЭКОСИСТЕМЫ, 2023, том 29, № 3 (96), с. 24-35

СИСТЕМНОЕ ИЗУЧЕНИЕ АРИДНЫХ ТЕРРИТОРИЙ

УДК 631.4

ГАРМОНИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ХИМИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАСОЛЕННОСТИ ПОЧВ

© 2023 г. К.О. Прокопьева, М.В. Конюшкова

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова
Россия, 119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 12. E-mail: christina.prokopyeva@gmail.com

Поступила в редукцию 15.03.2023. После доработки 28.03.2023. Принята к публикации 04.04.2023.

Засоление почв является одним из главных экологических факторов, который ограничивает рост и продуктивность многих растений. Оценка засоленности почв в разных странах мира проводится разными методами. В России и ряде других стран она оценивается методом водных вытяжек, в международной практике широко применяется метод оценки засоленности по электропроводности вытяжки из почвенных паст. Эти методы трудоемки, поэтому при массовом анализе используют сокращенные методики. Так, в России при солевых съемках почвы часто делают оценку по ведущему токсичному иону (хлору или натрию). В ряде зарубежных стран оценка дается по электропроводности при различных соотношениях почвы к воде (1: 1, 1: 2.5, 1: 5, 1: 10). В данной работе проведены сопоставления разных методов для обоснования возможности использования измерения электропроводности в суспензии 1: 5. Сравнивались следующие методы: 1 – метод определения удельной электропроводности в водной суспензии (1: 5); 2 – метод определения показателей pNa и pCl, измеряемых в водной суспензии (1: 5) с помощью ион-селективных электродов; 3 – определение натрия в водной вытяжке (1: 5) методом атомно-абсорбционной спектрометрии. Засоление оценивалось в образцах легкоглинистых почв сухостепной зоны преимущественно хлоридно-натриевого химизма засоления. Результаты показали, что при определении активности ионов наибольшая корреляция наблюдается между измерениями удельной электропроводности (кондуктометр) и активности натрия (ион-селективные электроды). Выявлена достаточно тесная связь между удельной электропроводностью и содержанием ионов натрия в водной вытяжке и получена функция пересчета этих показателей: $EC_{1:5} = 0.213Na_{1:5} + 0.17$ (со свободным членом), $EC_{1:5} = 0.23Na_{1:5}$ (без свободного члена). Для оценки степени засоления по показателю удельной электропроводности (1:5) предлагается использовать следующие критерии: 0-0.4 дСм/м – незасоленные, 0.4-0.6 дСм/м – слабозасоленные, 0.6-1 дСм/м – среднезасоленные, 1-1.9 дСм/м – (ильнозасоленные, > 1.9 дСм/м – очень сильнозасоленные. При сопоставлении различных градаций засоленности почв с помощью таблиц сопряженности с использованием хи-квадрат и индекса каппа выявлено наличие статистически значимой сопряженности, что позволяет использовать различные методы анализа почв для оценки степени засоления.

Ключевые слова: засоление; анализ почв; удельная электропроводность; ионоселективные электроды (ИСЭ); натрий; Прикаспийская низменность.
DOI: 10.24412/1993-3916-2023-3-24-35
EDN: WCVAFO

Гармонизация методов исследования почв, результатов анализов и единиц измерения имеет решающее значение для обмена информацией между разными научными группами, создания новых согласованных наборов данных о почвах и принятия решений в целях устойчивого управления почвенными ресурсами (Benedetti, Caon, 2021). В настоящее время такая гармонизация была проведена в отношении содержания почвенного органического вещества. Были установлены корреляционные коэффициенты, называемые педотрансферными функциями, между методами Тюрина и Уолкли-Блэка (Шамрикова и др., 2022; Shamrikova et al., 2022).

В 2022 году создана Национальная сеть почвенных лабораторий Русолан (ФАО …, 2022), основной деятельностью которой является разработка гармонизированных стандартов в почвоведении, в т.ч. приведение в соответствие национальных и международных методик измерений

для обеспечения сопоставимости и интерпретируемости аналитической информации о почвах, полученной в лабораториях внутри страны, между странами и регионами.

В отношении засоленных почв также проводился сравнительный анализ различных химических методов определения состава и степени их засоления (Копикова, Скулкин, 1990; Хитров, Понизовский, 1990; Сотнева, 2005).

В настоящее время как в отечественном, так и зарубежном почвоведении для оценки засоленности используются разнообразные методы исследования. Традиционным методом оценки в России и ряде других стран является анализ состава водной вытяжки (с соотношением почва: вода 1: 5) и почвенных растворов (Базилевич, Панкова, 1972). В международной практике широко используются критерии оценки по удельной электропроводности фильтратов (экстракта) из почвенных паст (EC_{SE}), разработанные USDA Salinity Laboratory (Diagnosis and Improvement …, 1954).

Общепринятые методы оценки засоленности почв зачастую являются длительными и трудоемкими. В связи с этим для массового определения засоления почв целесообразно использовать экспресс-методы (Сотнева, 2005). К числу таких методов относятся сокращенные водные вытяжки, в которых определяется содержание отдельных ионов, при этом определяют наиболее информативный ион, четко коррелирующий с суммой токсичных солей; при хлоридном типе засоления – хлорид-ион, при сульфатном – ион натрия; оценка засоления почв по удельной электропроводности и по активности ионов (Хитров, Понизовский, 1990).

Приготовление пасты и экстрактов из паст, также как и водная вытяжка, является трудоемким процессом, поэтому часто измеряется удельная электропроводность в водной суспензии с различным соотношением почвы и воды (1: 1, 1: 2.5, 1: 5, 1: 10). Значения удельной электропроводности (EC) в водной суспензии можно пересчитать в удельную электропроводность экстракта из почвенной пасты (ECe) с использованием эмпирических коэффициентов (Developments in Salinity …, 2013). Однако выявленные зависимости не являются универсальными и зависят от конкретной территории и типа почвы, в частности, ее гранулометрического состава.

В России Н.Г. Минашиной (1970), В.С. Муратовой и В.Ю. Маргулисом (1971) была сделана попытка учета гранулометрического состава при оценке засоленности на примере орошаемых почв хлопкосеющей зоны в Средней Азии.

Для тяжелосуглинистых почв сухостепной зоны (Нижнее Заволжье) применительно к культуре озимой пшеницы классификацию засоления почв по результатам анализа почвенных растворов разработали Б.А. Зимовец и З.Н. Кауричев (1976).

В исследованиях Н.И. Сотневой (2005) с разной степенью надежности были установлены критерии оценки степени засоления почв солонцовых комплексов севера Прикаспийской низменности Заволжья по различным показателям, полученным экспресс-методами, в частности, по содержанию иона Na+ в водных вытяжках и активностью натрия (aNa^+) в водонасыщенных пастах.

В исследованиях Л.П. Копиковой и В.С. Скулкина (1990) результаты сравнения засоления почв по сопряженным данным водных вытяжек и экстрактов из водонасыщенных паст позволили установить связь уровней засоления для гипсоносных почв сероземной зоны Средней Азии хлоридно-сульфатного и сульфатного химизма засоления с низкой емкостью поглощения.

В работе S. Sonmez с соавторами (2008) было показано, что для образцов почв разного гранулометрического состава, отобранных в районе Университета Акдениз (Турция), между значениями удельной электропроводности и концентрации ионов, измеренными в экстрактах насыщенной пасты и в экстрактах с различным соотношением почвы и воды, существует очень высокая и значимая корреляция. На основании полученных результатов был сделан вывод, что экстракты с соотношением (1: 1), (1: 2.5) или (1: 5) почвы к воде могут быть использованы для оценки удельной электропроводности насыщенной пасты и концентрации ионов в почве. Затем были построены регрессионные уравнения для различных соотношений почвы к воде и для почв разного гранулометрического состава.

В работе S. Karadağ с соавторами (2016) показано, что определение содержания натрия в почвенных суспензиях (или экстрактах вытяжек) с помощью ионоселективных электродов хорошо соотносится с данными определения с помощью ионной хроматографии ($R^2 = 0.94$).

В работе J.R. Davenport и J.D. Jabro (2001) для песчаных и суглинистых почв штата Вашингтон

(США) было показано, что ручные ионоселективные электроды могут использоваться для непосредственного измерения содержания ионов в почвах, в частности, для определения ионов калия и натрия при определенных диапазонах содержания влаги в почве.

В работе Y. Shirokova с соавторами (2000) на примере почв Центральной Азии для оценки засоления почв рекомендуется использовать измерение удельной электропроводности в водной суспензии (1: 1).

На основе литературного обзора можно заключить, что в России метод определения удельной электропроводности почвенной суспензии для оценки засоления не является общепринятым, однако по данному показателю, как показывают зарубежные публикации, можно надежно оценивать степень засоления почв.

Целью данной работы является сопоставление результатов химического исследования засоленности почв, полученных следующими методами для солонцовых почв севера Прикаспийской низменности: 1 – метод определения удельной электропроводности в водной суспензии (1: 5); 2 – метод определения показателей pNa и pCl, измеряемых в водной суспензии (1: 5) с помощью ион-селективных электродов; 3 – определение натрия в водной вытяжке (1: 5) методом атомно-абсорбционной спектрометрии.

Материалы и методы

На территории России засоленные почвы занимают площадь 46 млн. га (Khitrov et al., 2022). На юге страны особенно остро стоит проблема использования и мелиорации засоленных почв. Наибольшие площади засоленные почвы занимают в Калмыкии – 78% от почвенного покрова республики, Астраханской – 56.7% и Волгоградской области – 45%.

Участок, где проводились исследования, располагается на правобережье р. Волги в северной части Сарпинской низменности (Доскач, 1979), в районе посёлка Ики-Манлан (в 11 км на юго-запад; координаты: 47.965° с.ш., 45.551° в.д., абсолютная высота – 8 м н.у.м. БС; рис. 1). Территория исследования с точки зрения антропогенного преобразования является слабоосвоенной и используется в качестве пастбищных угодий. Территория относится к зоне светло-каштановых почв, формирующих комплексы с солонцами. Солонцы на территории республики распространены практически повсеместно и составляют в среднем около 32% в структуре ее почвенного покрова (Бакинова и др., 1999).

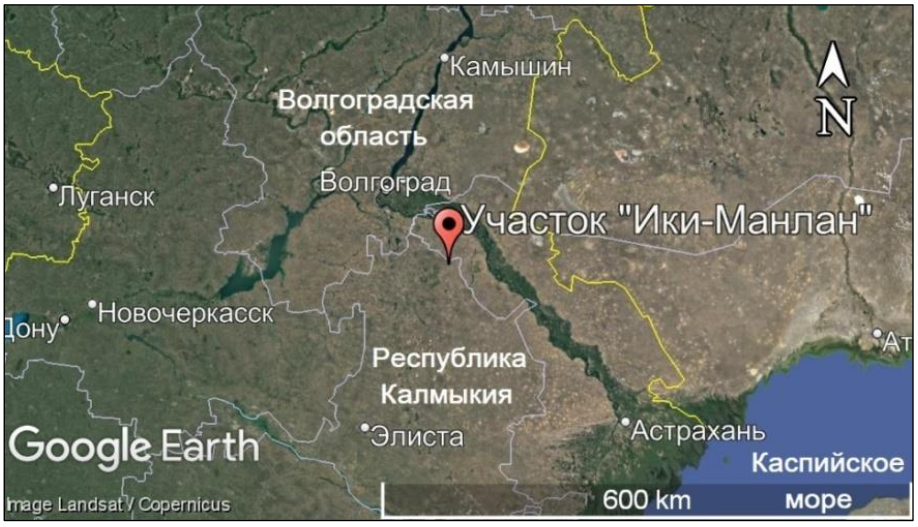

Рис. 1. Расположение ключевого участка в районе пос. Ики-Манлан Республики Калмыкия (в программе Google Earth Pro).

В ходе полевых работ на ключевом участке из центра одной округлой западины (микропонижения) до центра другой была проложена трансекта длиной около 60 м и проведена почвенная съемка с отбором образцов для выполнения химических анализов на определение засоленности почв. В общей сложности количество отобранных образцов составило 1139. В двух

почвенных разрезах (солонца и лугово-каштановой почве) были определены гранулометрический состав, содержание гумуса, гипса, карбонатов, состав водной вытяжки.

Все полученные образцы прошли пробоподготовку. Они были просушены до воздушно-сухого состояния. Пробы были пропущены через сито с диаметром отверстия в 1 мм. В подготовленных образцах почвы засоление оценивалось: 1 – 560 образцов по удельной электропроводности ($EC_{1:5}$) водной суспензии (1: 5); 2 – 507 образцов по активности ионов натрия и хлора (aNa^+, aCl^-), измеряемых в водной суспензии (1: 5) с помощью ион-селективных электродов; 3 – 72 образца по содержанию ионов натрия в водных вытяжках (1: 5) методом атомно-абсорбционной спектрометрии (ААС).

Измерения удельной электропроводности проводились в трехкратной повторности в водной суспензии с соотношением (1: 5) после осаждения твердых частиц (ГОСТ 26423-85, 1985) с помощью портативного кондуктометра Hanna HI98304 DiST 4 и лабораторного кондуктометра SanXin DDS-11C с широким диапазоном измерений.

Измерения показателей pNa, pCl проводились с помощью стеклянных ионселективных электродов (ИСЭ) серии ЭКОМ-Na, ЭКОМ-Cl на приборе Экотест-2000. Величина pNa и pCl оценивается как отрицательный логарифм активности определяемого иона.

В образцах почвы определяли Na^+ в водной вытяжке (1: 5) на пламенном спектрометре *Квант-2АТ* по стандартной методике ГОСТ 26427-85 (1985).

Математическая обработка результатов анализа проводилась с использованием различных модулей в программе STATISTICA.

Проверка гипотезы о наличии статистической связи между категориальными переменными проходила на основе таблиц сопряженности с использованием критерия хи-квадрат (Дмитриев, 2019). Индекс каппа рассчитывали для оценки тесноты этой связи (Самсонова, Мешалкина, 2011).

Результаты и обсуждение

Почвы. На участке «Ики-Манлан» распространены светло-каштановые почвы и солонцы. Согласно результатам анализа изученных почв, они характеризуются легкоглинистым гранулометрическим составом (горизонты В) и подстилаются тяжелосуглинистыми крупнопылевато-иловатыми породами (табл. 1). По химизму засоления солонец относится преимущественно к хлоридно-натриевому типу (табл. 2). Помимо хлоридов в водной вытяжке имеется заметное участие сульфатов. В солонце гипс практически отсутствует (табл. 2), но есть в небольшом количестве в горизонте Сса (57-90 см).

Сопоставление результатов измерений засоления почв. В ходе работы было проанализировано более тысячи образцов, в которых засоление почв характеризовалось по показателям, полученным в ходе общепринятых методов и экспресс-методов, в частности, с измерением удельной электропроводности водной суспензии (1: 5). Каждый из этих методов позволяет извлечь определенную часть находящихся в почве солей (Копикова, Скулкин, 1990).

Анализируемые почвы характеризуются разной степенью засоления – от незасоленных до очень сильно засоленных. Наглядный профиль засоления вдоль данной трансекты и общая характеристика почв приведены в работе К.О. Прокопьевой (2022) и другой работе, выполненной с соавторами (2021). Расчет описательных статистик для содержания Na^+ в водной вытяжке (смоль(экв.)/кг почвы) показал, что среднее значение равно 2.53, медиана – 0.15, минимальное значение – 0.04, максимальное – 15.74 и стандартное отклонение – 4.57 (табл. 3).

Связь между удельной электропроводностью и активностями ионов натрия и хлора, измеряемыми в водной суспензии (1:5), показана на рисунке 2. Между тремя показателями выявлены относительно тесные коррелятивные связи. Наиболее высокий коэффициент корреляции установлен между удельной электропроводностью и активностью иона натрия ИСЭ ($r = 0.94$, $n = 488$). Для хлорид-иона ИСЭ он составил: $r = 0.90$, $n = 417$. Корреляция показателей активности ионов натрия и хлора довольно высокая ($r = 0.87$, $n = 507$), т.к. данные ионы являются определяющими для почв хлоридно-натриевого химизма засоления, к которому относятся изучаемые почвы. По этим ионам можно проводить оценку степени засоления данных почв.

Было проведено сопоставление результатов анализа удельной электропроводности с измерениями натрия в водной вытяжке (1: 5) методом пламенной ААС (рис. 3).

Таблица 1. Данные анализа гранулометрического состава почв.

Горизонт	Глубина, см	Гигроскопическая влага, %	Содержание фракций, % (размер частиц, мм)						Сумма частиц		Гранулометрический состав*
			1.0-0.25	0.25-0.05	0.05-0.01	0.01-0.005	0.005-0.001	<0.001	>0.01	<0.01	
Солонец солончаковый											
А	0-12	1.2	0.1	16.4	48.5	10.1	14.6	10.3	65.0	35.0	ССкп
В1	12-30	3.1	0.1	10.1	33.1	7.2	10.4	39.1	43.3	56.7	ЛГи-кп
В2	30-45	3.4	0.1	10.5	35.5	5.9	10.3	37.7	46.2	53.8	ЛГи-кп
ВС	45-55	2.7	0.0	8.4	40.3	5.8	11.6	33.9	48.7	51.3	ЛГкп-и
Сса	60-80	2.5	0.3	8.8	41.0	6.9	12.9	30.1	50.1	49.9	ТСкп-и
Сса	100-120	2.0	0.2	13.4	37.9	7.5	12.9	28.2	51.4	48.6	ТСкп-и
Сса	120-140	2.3	0.1	15.2	37.4	6.6	12.2	28.5	52.7	47.3	ТСкп-и
Сса	140-160	2.3	0.1	16.4	38.4	6.5	10.4	28.2	54.8	45.2	ТСкп-и
Сса	160-180	2.6	0.1	20.3	35.5	5.7	9.7	28.7	55.8	44.2	ТСкп-и
Сса	180-200	2.5	0.1	20.4	33.3	5.8	9.6	30.9	53.8	46.2	ТСкп-и
Лугово-каштановая почва											
А'	0-16	2.3	0.2	12.6	44.0	11.8	17.3	14.1	56.8	43.2	ТСкп
А''	16-30	2.5	0.1	13.6	41.0	11.1	16.0	18.2	54.7	45.3	ТСкп
В	30-45	3.0	0.1	10.3	36.8	6.7	9.8	36.3	47.2	52.8	ЛГкп-и
ВС	50-60	3.1	0.1	9.1	39.6	6.4	8.5	36.4	48.8	51.2	ЛГкп-и

Примечания к таблице 1. *Гранулометрический состав: ССкп – средний суглинок крупнопылеватый, ЛГи-кп – легкая глина иловато-крупнопылеватая (и > кп), ЛГкп-и – легкая глина крупнопылевато-иловатая (кп > и), ТСкп-и – тяжелый суглинок крупнопылевато-иловатый, ТСкп – тяжелый суглинок крупнопылеватый.

Выявлена достаточно тесная коррелятивная связь между Na^+ (ААС) и удельной электропроводностью водной суспензии (r = 0.97; n = 72) и получена следующая функция связи: $EC_{1:5} = 0.213Na_{1:5} + 0.17$ (со свободным членом), $EC_{1:5} = 0.23Na_{1:5}$ (без свободного члена).

В работе Л.П. Копиковой и В.С. Скулкина (1990) при сравнении концентрации иона натрия водной вытяжки и удельной электропроводности экстракта коэффициент корреляции составил 0.94 (при n = 48), а уравнение регрессии получилось следующее: $EC_{паста} = 1.34Na_{1:5} + 1.75$ (экстракт). Используя для сопоставления с нашими результатами уравнение пересчета из публикации J.R. Landon (1991) для почв, не содержащих большого количества гипса ($ECe = 6.4\ EC_{1:5}$), получаем уравнение следующего вида: $EC_{1:5} = (0.213 \cdot 6.4)Na_{1:5} + 0.17$ или $EC_{1:5} = 1.36Na_{1:5} + 1.09$, что является результатом, близким к уравнению Л.П. Копиковой и В.С. Скулкина (1990).

В исследованиях Н.И. Сотневой (2005) не проводилось такого сопоставления, однако при сравнении активности иона натрия с электропроводностью фильтратов из паст было получено следующее уравнение регрессии (r = 0.99, n = 6): $EC_{паста} = 0.2017Na + 0.3473$ (aNa паста). Стоит отметить, что число анализируемых проб составило всего 6, а содержание натрия определялось по разности между ионами кальция и магния. Тем не менее, коэффициенты в этой работе оказались близки к нашим.

Таким образом, согласно нашим данным и анализу опубликованных данных, можно предложить следующие уравнения пересчета показателей засоления: $EC_{1:5} = 0.213Na_{1:5} + 0.17$ (со свободным членом) и $EC_{1:5} = 0.23Na_{1:5}$ (без свободного члена).

Сопоставление вычисленной оценки с опубликованными данными. В таблице 4 приведено сопоставление оценки степени засоления почв, вычисленной по нашим данным и по опубликованным источникам. Как видно из таблицы, градации, вычисленные по показателю содержания водорастворимого натрия согласно разработанному нами уравнению пересчета в электропроводность, хорошо сопоставимы с опубликованными данными, в особенности с

критериями, полученными в публикации S. Sonmez с соавторами (2008). Таким образом, заключаем, что можно использовать уравнение пересчета между водорастворимым натрием $EC_{1:5} = 0.23Na_{1:5}$, $EC_{1:5} = 0.213Na_{1:5} + 0.17$ и критериями, предложенными в таблице 4.

Таблица 2. Химические свойства почв ключевого участка.

Горизонт	Глубина, см	Гумус, %	pH водн. выт., (1: 5)	HCO_3	Cl	SO_4	Ca	Mg	Na	K	CO_2 карб., %	SO_4 общ., %
				смоль(экв.)/кг почвы								
Солонец солончаковый												
A	0-12	1.44	7.28	0.54	0.15	0.12	0.18	0.28	0.43	0.09	–	–
B1	12-30	1.63	8.87	0.95	2.36	0.44	0.23	0.30	3.42	0.02	–	–
B2	30-45	0.98	8.78	0.52	6.52	1.92	0.43	0.55	8.93	0.02	0.13	–
BC	45-55	0.54	9.06	0.56	6.83	2.80	0.48	0.68	9.83	0.03	2.38	–
Cca	60-80	–	8.22	0.23	6.07	15.44	6.78	3.53	10.75	0.06	3.43	1.18
Cca	100-120	–	8.79	0.44	6.54	3.48	0.58	1.00	9.66	0.05	2.53	0.15
Cca	120-140	–	8.97	0.45	8.31	3.52	0.68	0.85	9.89	0.04	2.16	0.15
Cca	140-160	–	8.70	0.34	6.27	5.56	0.93	1.38	10.35	0.04	1.85	0.23
Cca	160-180	–	8.63	0.31	6.19	8.60	1.48	1.60	10.61	0.05	1.45	0.33
Cca	180-200	–	8.88	0.37	6.79	3.08	0.75	1.15	10.31	0.05	1.42	0.31
	200-250	–	8.90	0.32	6.62	3.76	0.65	1.00	8.83	0.04	2.29	0.18
	250-300	–	9.05	0.48	5.47	2.92	0.45	0.30	7.77	0.02	2.73	0.17
	300-350	–	8.93	0.36	5.07	5.56	0.65	0.95	9.00	0.03	2.11	0.29
	350-400	–	8.85	0.32	5.28	6.72	1.10	1.90	9.73	0.03	1.98	0.39
	400-450	–	8.92	0.36	5.18	5.88	0.80	0.85	9.34	0.03	2.02	0.30
	450-500	–	8.89	0.40	4.85	6.12	1.00	0.70	8.77	0.03	2.42	0.37
	500-550	–	8.99	0.36	5.18	5.04	0.95	0.20	8.99	0.03	2.16	0.24
	550-600	–	8.99	0.34	4.99	5.32	0.65	0.50	8.95	0.03	1.85	0.32
Лугово-каштановая почва												
A'	0-16	2.68	7.14	0.17	0.03	0.16	0.18	0.20	0.02	0.15	–	–
A"	16-30	1.92	7.22	0.13	0.03	0.20	0.23	0.18	0.04	0.14	–	–
B	30-45	1.28	7.21	0.17	0.02	0.12	0.15	0.20	0.03	0.09	–	–
BC	50-60	1.16	8.29	0.62	0.05	0.20	0.43	0.37	0.06	0.12	–	–
	80-100	–	8.63	0.52	0.06	0.08	0.35	0.10	0.07	0.11	3.78	0.03
	100-120	–	8.66	0.52	0.02	0.12	0.45	0.05	0.13	0.13	3.08	0.02
	120-140	–	8.59	0.54	0.07	0.14	0.40	0.15	0.17	0.13	1.80	0.00
	140-160	–	9.29	0.56	0.05	0.04	0.25	0.25	0.17	0.10	1.98	0.01
	160-180	–	8.87	0.62	0.05	0.16	0.25	0.35	0.32	0.08	2.42	0.20
	180-200	–	8.76	0.60	0.10	0.20	0.30	0.15	0.48	0.07	2.02	0.00
	200-250	–	8.67	0.48	1.30	0.32	0.40	0.45	1.06	0.09	1.80	0.20
	250-300	–	8.47	0.48	2.78	0.20	0.70	0.90	1.65	0.09	2.77	0.01
	300-350	–	8.55	0.38	2.93	0.28	0.55	1.00	2.01	0.06	3.43	0.02
	350-400	–	8.57	0.30	3.17	0.44	0.65	0.75	2.65	0.04	2.64	0.05
	400-450	–	8.54	0.42	2.78	0.68	0.45	0.75	2.82	0.04	1.80	0.03
	450-500	–	9.15	0.34	2.62	1.00	0.45	0.55	2.95	0.03	1.89	0.04
	500-550	–	8.66	0.38	2.59	1.24	0.60	0.45	3.39	0.03	1.67	0.06
	550-600	–	8.56	0.44	2.69	1.64	0.65	0.50	3.72	0.03	2.33	0.11

Пересчетные коэффициенты для легкоглинистых почв хлоридно-натриевого химизма засоления представлены в таблице 5.

Анализ таблиц сопряженности. В ходе анализа проведено сопоставление следующих градаций

засоленности почв из таблицы 4: содержание иона натрия в водной вытяжке 1: 5 (смоль(экв.)/кг почвы) и электропроводности в суспензии 1: 5 (дСм/м), рассчитанных согласно разным источникам. Результаты были представлены в виде таблицы сопряженности (табл. 6). На пересечении строки и столбца указана частота совпадений по степени засоления согласно различным градациям.

Проверка по критерию хи-квадрат показала наличие значимых статистических связей между переменными. Во всех случаях значения хи-квадрат получились больше табличных значений (при p = 0.05).

Таблица 3. Описательные (дескриптивные) статистики для иона натрия и удельной электропроводности, измеренных в водной вытяжке (суспензии) 1: 5.

Показатели	Среднее	Медиана	Стандартное отклонение	Минимум	Максимум
$EC_{1:5}$, дСм/м	0.71	0.27	1.01	0.13	4.72
Na^+ (ААС), смоль(экв.)/кг почвы	2.53	0.15	4.57	0.04	15.74

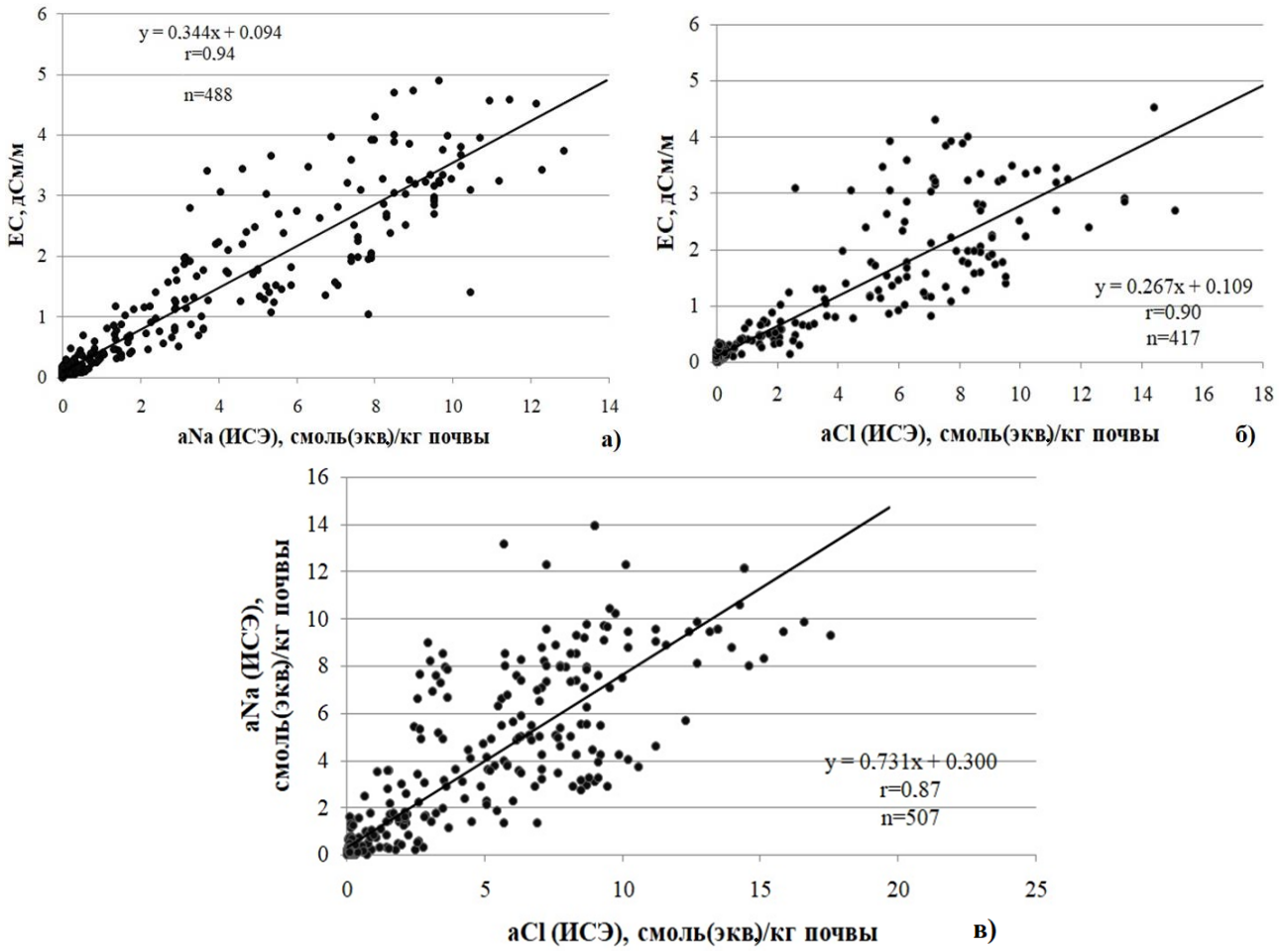

Рис. 2. Связь результатов анализа (Ики-Манлан) электропроводности и ионов хлора и натрия: А – активность ионов натрия (ИСЭ) и электропроводность (1: 5), Б – активность ионов хлора (ИСЭ) и электропроводность (1: 5), В – активности ионов хлора и натрия (ИСЭ; 1: 5). *Условные обозначения:* r – коэффициент корреляции, n – число проб для уравнений линейных трпндов.

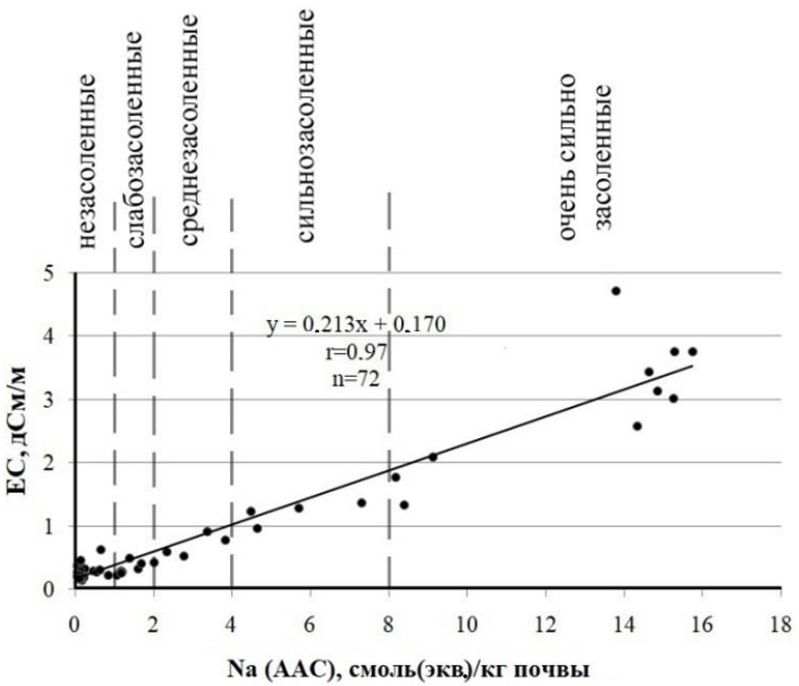

Рис. 3. Связь результатов анализа содержания ионов натрия (1: 5; AAC) и электропроводности (1: 5) с выделением степеней засоления по Na^+ согласно работе «Засоленные почвы России» (2006). *Условные обозначения:* r – коэффициент корреляции, n – число проб для уравнения линейного тренда.

Таблица 4. Оценка степени засоления почв по натрию и удельной электропроводности согласно разным источникам.

Степень засоления	**$Na_{1:5}$ (смоль(экв.)/кг почвы)**	**EC экстракт, дСм/м**		**$EC_{1:5}$, дСм/м**			
Источник*	1	2	3	4	5	6	7
Незасоленные	<1	<2	<3	<0.25	<0.3	<0.23	<0.38
Слабозасоленные	1-2	2-4	3-5	0.25-0.5	0.3-0.6	0.23-0.46	0.38-0.6
Среднезасоленные	2-4	4-8	5-10	0.5-1.0	0.6-1.25	0.46-0.92	0.6-1.02
Сильнозасоленные	4-8	8-16	10-16	1-2	1.25-2.5	0.92-1.84	1.02-1.87
Очень сильнозасоленные	>8	>16	>16	>2	>2.5	>1.84	>1.87

Примечания к таблице 4. *Источник: 1 – критерии даны согласно монографии «Засоленные почвы России» (2006) для хлоридного и сульфатно-хлоридного химизма засоления, 2 – критерии даны по «US Salinity Lab» (Richards, 1954), 3 – критерии даны по Л.П. Копиковой и В.С. Скулкину (1990), 4 – пересчет критериев (Richards, 1954) по S. Sonmez с соавторами (2008) для суглинистых почв ($EC_{1:5}$ = ECe / 7.62), 5 – пересчет критериев (Richards, 1954) по J.R. Landon (1991) для почв, не содержащих большого количества гипса ($EC_{1:5}$ = ECe / 6.4), 6 – пересчет критериев из «Засоленные почвы России» (2006) согласно нашим данным для легкоглинистых почв хлоридно-натриевого химизма засоления ($EC_{1:5} = 0.23Na_{1:5}$), 7 – пересчет критериев из «Засоленные почвы России» (2006) согласно нашим данным для легкоглинистых почв хлоридно-натриевого химизма засоления ($EC_{1:5} = 0.213Na_{1:5} + 0.17$).

Согласно таблице 6, высокие значения индекса каппа показывают, что совпадения между рассматриваемыми градациями не случайны. Интерпретация значений индекса каппа следующая: 0.21-0.40 – удовлетворительное совпадение, 0.41-0.60 – хорошее совпадение, 0.61-0.80 – существенное совпадение, 0.80-0.99 – почти полное совпадение.

Таблица 5. Коэффициент детерминации (R^2) и регрессионные уравнения, описывающие связи между результатами химического исследования засоленности почв, полученные разными методами, для легкоглинистых почв хлоридно-натриевого типа засоления.

Со свободным членом		Без свободного члена		y	x	n
Уравнение	R^2	Уравнение	R^2			
y = 0.213x + 0.170	0.934	y = 0.229x	0.912	$EC_{1:5}$, дСм/м	Na^+ 1: 5 (ААС), смоль(экв.)/кг почвы	72
y = 0.344x + 0.094	0.882	y = 0.358x	0.877	$EC_{1:5}$, дСм/м	aNa 1: 5 (ИСЭ), смоль(экв.)/кг почвы	488
y = 0.267x + 0.109	0.802	y = 0.281x	0.793	$EC_{1:5}$, дСм/м	aCl 1: 5 (ИСЭ), смоль(экв.)/кг почвы	417

Таблица 6. Таблица сопряженности между градациями по содержанию водорастворимого натрия и электропроводности в суспензии (1: 5).

Источник: S. Sonmez с соавторами (2008), $EC_{1:5}$ = ECe / 7.62						
	$Na_{1:5}$ (смоль(экв.)/кг почвы)					Всего
$EC_{1:5}$ (дСм/м)	<1	1-2	2-4	4-8	>8	
<0.25	29	2	0	0	0	**31**
0.25-0.5	16	6	0	0	0	**22**
0.5-1.0	1	0	4	1	0	**6**
1-2	0	0	0	3	2	**5**
>2	0	0	0	0	8	**8**
Всего	**46**	**8**	**4**	**4**	**10**	**72**
Общая точность	0.69					
Точность, обусловленная случаем	0.33					
Каппа	0.54					
Источник: J.R. Landon (1991), $EC_{1:5}$ = ECe / 6.4						
	$Na_{1:5}$ (смоль(экв.)/кг почвы)					Всего
$EC_{1:5}$ (дСм/м)	<1	1-2	2-4	4-8	>8	
< 0.3	38	4	0	0	0	**42**
0.3-0.6	7	4	2	0	0	**13**
0.6-1.25	1	0	2	2	0	**5**
1.25-2.5	0	0	0	2	3	**5**
> 2.5	0	0	0	0	7	**7**
Всего	**46**	**8**	**4**	**4**	**10**	**72**
Общая точность	0,74					
Точность, обусловленная случаем	0,41					
Каппа	0,55					
Источник: наши данные, $EC_{1:5}$ = 0.23$Na_{1:5}$						
	$Na_{1:5}$ (смоль(экв.)/кг почвы)					Всего
$EC_{1:5}$ (дСм/м)	< 1	1-2	2-4	4-8	> 8	
< 0.23	26	1	0	0	0	**27**
0.23-0.46	19	6	0	0	0	**25**
0.46-0.92	1	1	4	0	0	**6**
0.92-1.84	0	0	0	4	2	**6**
> 1.84	0	0	0	0	8	**8**

Продолжение таблицы 6.

Источник: наши данные, $EC_{1:5}$ = 0.23$Na_{1:5}$						
Всего	**46**	**8**	**4**	**4**	**10**	**72**
Общая точность	0.67					
Точность, обусловленная случаем	0.30					
Каппа	0.52					
Источник: наши данные, $EC_{1:5}$ = 0.213$Na_{1:5}$ + 0.17						
	$Na_{1:5}$ (смоль(экв.)/кг почвы)					Всего
$EC_{1:5}$ (дСм/м)	< 1	1-2	2-4	4-8	> 8	
< 0.38	44	5	0	0	0	**49**
0.38-0.6	1	3	2	0	0	**6**
0.6-1.02	1	0	2	1	0	**4**
1.02-1.87	0	0	0	3	2	**5**
> 1.87	0	0	0	0	8	**8**
Всего	**46**	**8**	**4**	**4**	**10**	**72**
Общая точность	0.83					
Точность, обусловленная случаем	0.47					
Каппа	0.69					

Примечания к таблице 6: по главной диагонали серой заливкой выделено число значений, которые отнесены к одному и тому же классу степени засоления.

Самый высокий индекс выявлен для градации засоленности почв, вычисленной на основе нашего уравнения со свободным членом ($EC_{1:5}$ = 0.213$Na_{1:5}$ + 0.17), и составляет 0.69 (существенное совпадение). Высокий индекс каппа связан с тем, что очень хорошо совпали данные для первой категории по степени засоления (< 1). В остальных трех случаях получились близкие значения индекса каппа (0.54, 0.55 и 0.52 соответственно), а величина индекса говорит о хорошем совпадении. Как видно из таблицы 6, совпадение для первой градации получилось хуже, чем в первом случае, но лучше для других градаций.

Таким образом, можно рекомендовать использование следующих градаций для оценки степени засоления почв по данным электропроводности в суспензии 1: 5 (дСм/м): 0-0.4 – незасоленные, 0.4-0.6 – слабозасоленные, 0.6-1.0 – среднезасоленные, 1-1.9 – сильнозасоленные, >1.9 – очень сильнозасоленные.

Выводы

В работе представлено сопоставление результатов химического исследования засоленности в суспензии (1: 5 легкоглинистых почв сухостепной зоны преимущественно хлоридно-натриевого химизма, полученных в ходе различных методов определения.

При измерениях активности ионов в суспензии (1: 5) наибольшая корреляция наблюдается между измерениями удельной электропроводности и активности натрия.

Согласно нашим данным и анализу опубликованных данных, $EC_{1:5}$ = 0.213$Na_{1:5}$ + 0.17, $EC_{1:5}$ = 0.23$Na_{1:5}$

Для оценки степени засоления по показателю удельной электропроводности (1: 5) предлагается использовать следующие критерии (дСм/м): 0-0.4 – незасоленные, 0.4-0.6 – слабозасоленные, 0.6-1.0 – среднезасоленные, 1-1.9 – сильнозасоленные, >1.9 – очень сильнозасоленные.

При сопоставлении различных градаций засоленности почв с помощью таблиц сопряженности с использованием хи-квадрат и индекса каппа выявлено наличие статистически значимой сопряженности, что позволяет использовать различные методы анализа почв для оценки степени засоления.

Вычисленные по нашим данным критерии оценки засоления почв по удельной электропроводности в суспензии (1: 5) согласуются с критериями в зарубежных публикациях.

Предложены пересчетные коэффициенты и таблица оценки по степени засоления почв в зависимости от различных показателей, которые используются.

Финансирование. Работа выполнена за счет финансирования, выделенного на цели функционирования Евразийского центра по продовольственной безопасности МГУ им. М.В. Ломоносова (распоряжение Правительства РФ № 1736-р от 26.06.2021).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Базилевич Н.И., Панкова Е.И. 1972. Опыт классификации почв по содержанию токсичных солей и ионов // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. Вып. 5. С. 36-40

Бакинова Т.И., Воробьева Н.П., Зеленская Е.А. 1999. Почвы Республики Калмыкия. Элиста-Ростов-на-Дону: Изд-во Северо-Кавказского научного центра высшей школы. 115 с.

ГОСТ 26427-85. 1985. Почвы. Метод определения натрия и калия в водной вытяжке // Сборник ГОСТов. М.: Издательство стандартов.

ГОСТ 26423-85. 1985. Почвы. Методы определения удельной электрической проводимости, pH и плотного остатка водной вытяжки // Сборник ГОСТов. М.: Издательство стандартов.

Дмитриев Е.А. 2019. Математическая статистика в почвоведении. М.: URSS. 334 с.

Доскач А.Г. 1979. Природное районирование Прикаспийской полупустыни. М.: Наука. 142 с.

Засоленные почвы России. 2006. М.: Академкнига. 854 с.

Зимовец Б.А., Кауричева З.Н. 1976. Определение степени и типа засоления почв по почвенным растворам и водным вытяжкам в сухостепной зоне Нижнего Поволжья // Орошаемые почвы и методы их изучения. Ташкент. С. 72-83.

Копикова Л.П., Скулкин В.С. 1990. Оценка засоления почв по сопряженным данным водных вытяжек и экстрактов из водонасыщенных паст // Условия формирования и свойства трудномелиорируемых почв Джизакской степи: Научные труды Почвенного института им. В.В. Докучаева. М. С. 74-81.

Минашина Н.Г. 1970. Токсичные соли в почвенном растворе, их расчет и классификация почв по степени засоления // Почвоведение. № 81971.. С. 92-105.

Муратова В.С., Маргулис В.Ю. Содержание токсичных солей в водных вытяжках и почвенных растворах гипсоносных почв Голодной степи // Почвоведение. № 12. С. 87-99.

Прокопьева К.О., Конюшкова М.В., Новикова Н.М., Соболев И.В. 2021. Цифровая фитоиндикация засоления почв в сухой степи (Республика Калмыкия) // Аридные экосистемы. Т. 27. № 2 (87). С. 68-81. [*Prokopyeva K.O., Konyushkova M.V., Novikova N.M., Sobolev I.V.* 2021. Digital Phytoindication of Soil Salinity in Dry Steppes (Republic of Kalmykia) // Arid Ecosystems. Vol. 11. No. 2. P. 173-185.]

*Прокопьева К.*О. 2022. Использование разновременных космических снимков высокого разрешения для оценки засоления почв солонцового комплекса (Республика Калмыкия) // Аридные экосистемы. Т. 28. № 4 (93). С. 61-74. [*Prokopyeva K.O.* 2022. The Use of Multi-Temporal High-Resolution Satellite Images to Soil Salinity Assessment of the Solonetzic Complex (Republic of Kalmykia) // Arid Ecosystems. Vol. 12. No. 4. P. 394-406.]

Самсонова В.П., Мешалкина Ю.Л. 2011. Количественный метод сравнения почвенных карт и картограмм // Вестник Московского университета. Сер. 17, Почвоведение. № 3. С. 3-5.

Сотнева Н.И. 2005. Применение экспресс-методов для оценки почв по степени засоления (на примере почв севера Прикаспийской низменности) // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. № 57. С. 68-80.

ФАО запускает Российскую сеть почвенных лабораторий. 2022 [Электронный ресурс https://www.fao.org/russian-federation/news/detail/ru/c/1512615/ (Дата обращения 25.12.2022)].

Хитров Н.Б., Понизовский А.А. 1990. Руководство по лабораторным методам исследования ионно-солевого состава нейтральных и щелочных минеральных почв. М.: Почвенный институт им. В. В. Докучаева. 236 с.

Шамрикова Е.В., Ванчикова Е.В., Кондратёнок Б.М., Лаптева Е.М., Кострова С.Н. 2022. Проблемы и ограничения дихроматометрического метода измерения содержания почвенного органического вещества (обзор) // Почвоведение. № 7. С. 787-794.

Benedetti F., Caon L. 2021. Global Soil Laboratory Assessment 2020 – Laboratories' Capacities and Needs. Rome, FAO. 38 p.

Davenport J.R., Jabro J.D. 2001. Assessment of Hand Held Ion Selective Electrode Technology for Direct Measurement of Soil Chemical Properties // Communications in Soil Science and Plant Analysis. Vol. 32. No. 19-20. P. 3077-3085.

Developments in Salinity Assessment, Modeling, Mapping, and Monitoring from Regional to Submicroscopic Scales. 2013 // Developments in Soil Salinity Assessment and Reclamation – Innovative Thinking and Use of Marginal Soil and Water Resources in Irrigated Agriculture / eds. S.A. Shahid, M.A. Abdelfattah, F.K. Taha. Springer, Dordrecht/Heidelberg/New York/London. P. 3-43.

Diagnosis and Improvement of Saline and Alkaline Soils: USDA Agriculture Handbook. 1954. No. 60. 160 p.

Karadağ S., Eren E., Çetinkaya E., Özen S., Deveci S. 2016. Optimization of Sodium Extraction from Soil by Using a Central Composite Design (CCD) and Determination of Soil Sodium Content by Ion Selective Electrodes // Eurasian Journal of Soil Science. No. 5 (2). P. 89-96.

Khitrov N.B., Rukhovich D.I., Pankova E.I., Novikova A.F., Vilchevskaya E.V., Kalinina N.V., Koroleva P.V., Chernousenko G.I., Konyushkova M.V. 2022. Salt-Affected Soils of the Russian Federation // Global Assessment of the Status of Salt-Affected Soils. Rome: FAO.

Landon J.R. 1991. Booker Tropical Soil Manual. Booker Tate Limited. 474 p.

Shamrikova E.V., Kondratenok B.M., Tumanova E.A., Vanchikova E.V., Lapteva E.M., Zonova T.V., Lu-Lyan-Min E.I., Davydova A.P., Libohova Z., Suvannang N. 2022. Transferability between Soil Organic Matter Measurement Methods for Database Harmonization // Geoderma. Vol. 412. P. 115547.

Shirokova Y., Forkutsa I., Sharafutdinova N. 2000. Use of Electrical Conductivity instead of Soluble Salts for Soil Salinity Monitoring in Central Asia // Irrigation and Drainage Systems. No. 14. P. 199-205.

Sonmez, S., Buyuktas D., Okturen F., Citak S. 2008. Assessment of Different Soil Water Ratios (1:1, 1:2.5, 1:5) in Soil Salinity Studies // Geoderma. Vol. 144. P. 361-369.