

**ФИЗИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ЗАСОЛЕННЫХ ПОЧВ СРЕДНЕЙ И СИЛЬНОЙ СТЕПЕНИ
ОПУСТЫНИВАНИЯ В ДЕЛЬТЕ ВОЛГИ**А. В. Федотова¹, А. Б. Умарова², Э. В. Спасенков³¹ *Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения
Российской академии наук (ФНЦ агроэкологии РАН),
400062, г. Волгоград, Университетский проспект, 97;*² *Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова,
119991, г. Москва, Ленинские горы, 1;*³ *Астраханский государственный университет им. В. Н. Татищева,
414056, г. Астрахань, ул. Татищева, 20а,
E-mail: fedotova-a@yrfanc.ru**Поступила в редакцию 26.06.2023, принята к печати 31.08.2023*

В работе была проведена оценка физического состояния засоленных почв разной степени опустынивания. Установлены закономерности изменения базовых физических свойств почвы. В качестве экспериментальных были выбраны два типичных участка в бугровом ландшафте дельты Волги, имеющие среднюю и сильную степени галоморфного опустынивания. Почвенный покров участков представлен зональной бурой аридной почвой и гидроморфным солончаком, участки различаются по положению в рельефе и водно-солевому режиму. На каждом участке были заложены сетки опробования, в узлах которых проведены полевые определения и отобраны образцы почвы. Изучены физические свойства почв галоморфного опустынивания (плотность почвы, влажность почвы, наименьшая влагоемкость, структурное состояние, водопроницаемость и сопротивление пенетрации). Также определены засоленность и содержание солей. Результаты сравнительного анализа показали, что статистически значимые различия почв разной степени опустынивания наблюдаются по таким физическим свойствам, как влагообеспеченность почвы, сопротивление пенетрации и водопроницаемость, а также содержание солей в поверхностном слое. Данные свойства являются наиболее чувствительными к проявлениям процессов опустынивания. Установлена закономерность резкого ухудшения физического состояния и повышения содержания солей в поверхностном слое при увеличении степени опустынивания и автоморфности почвы. Не выявлено статистически значимых различий в структурном состоянии и плотности почвы. Установлено, что при увеличении степени автоморфности почвы происходит переход от средней степени опустынивания к сильной при резком ухудшении наиболее чувствительных к опустыниванию физических свойств почвы.

Ключевые слова: почва, физические свойства почвы, засоление почв, опустынивание, дельта Волги.

**PHYSICAL CONDITIONS OF SALINE SOILS WITH MEDIUM AND STRONG DEGREE OF
DESERTIFICATION IN VOLGA DELTA**A. V. Fedotova¹, A. B. Umarova², E. V. Spasnikov³¹ *Federal Scientific Centre of Agroecology, Complex Melioration and Protective Afforestation
of the Russian Academy of Sciences (FSC of Agroecology RAS)
97, Universitetskiy Avenue, Volgograd, 400062, E-mail: fedotova-a@yrfanc.ru;*² *Moscow State University named after M. V. Lomonosov,
1 Leninskiye Gory, Moscow, 119991*³ *Astrakhan State University named after V. N. Tatishchev,
20a, st. Tatishcheva, Astrakhan, 414056,*

The physical state of saline soils of various degrees of desertification was assessed within the framework of the research. Regularities of changes in the basic physical properties of the soils have been established. Two typical sites in the hilly landscape of the Volga delta with medium and strong degrees of halomorphic desertification were selected as experimental. The soil cover of the sites was represented by zonal brown arid soil and hydromorphic solonchak; the sites were different in their position in the relief and in water-salt regime. At each site, sampling grids were laid and at the nodes of these grids field measurements were carried out and soil samples were collected. The physical properties of the soils (soil bulk density, soil moisture content, field capacity, structural state, water permeability and penetration resistance) were studied. The salinity and salt content in the samples were also measured. The results of a comparative analysis have shown that differences between the soils of different degrees of desertification were statistically significant for such physical properties as soil moisture, penetration resistance and water permeability, as well as for the salt content in the topsoil. These properties were the most sensitive to the

manifestation of desertification processes. A sharp deterioration in the soil physical conditions combined with an increase in the topsoil salt content has been marked when the degree of soil desertification and soil automorphism were increasing. No statistically significant differences were found between the studied soils in their structural state or bulk density. It was established that with an increase in the degree of soil automorphism, a transition of the soil from the medium to the strong degree of desertification was occurring with a sharp deterioration in the soil physical properties that were most sensitive to desertification.

Key words: soil, soil physical properties, soil salinization, desertification, Volga delta.

ВВЕДЕНИЕ

В южных регионах России интенсивно развиваются процессы опустынивания. Повышение среднегодовых температур (на 1,07 °C по Астраханской области) на фоне уменьшения количества атмосферных осадков до критического уровня значительно увеличивает скорость развития процессов опустынивания (Национальный доклад, 2021). О негативных последствиях опустынивания заявлено на самом высоком международном уровне. Дальнейшее развитие опустынивания и деградации почв может привести к экологическому бедствию в дельте Волги, являющейся экологически уязвимым регионом, где еще сохранились уникальные природные экосистемы с существенным биологическим и ландшафтным разнообразием (Гидрологический режим, 2021).

Вопросы борьбы с опустыниванием активно обсуждались еще в XX веке (Розанов, 1977; Розанов, Зонн, 1981; Ковда, 1984; Бабаев, 1986; Проблемы опустынивания, 1989).

Ключевым звеном в деградации опустыненных экосистем является почва. Опустынивание почв предполагает изменение почвенных свойств под действием природных и/или антропогенных факторов, что приводит к дефициту почвенной влаги и закономерному изменению растительного покрова в сторону увеличения численности пустынных видов (Щерба, Гасанов, 2015). Исследование состояния почвы и ее свойств крайне важно и необходимо для изучения сукцессии растительного сообщества и дальнейшей эволюции экосистем (Wei et al., 2012).

Исследования опустынивания как экологического процесса проводятся в достаточно большом количестве в разных регионах мира (He et al., 2023; Lamaamri et al., 2023; Rajendran et al., 2023; Yi et al., 2023; Дорошенко, 2023; Oğlu et al., 2023 и многие другие). Однако работ, посвященных оценке почвенных свойств, физического состояния почвы и особенно закономерностей его изменения в процессе развития опустынивания, довольно немного.

Установление особенностей изменения физических свойств почвы в условиях развития таких специфических процессов, как засоление и опустынивание, позволит выявить взаимосвязи и механизмы действия различных звеньев, а также разработать научную основу для их охраны и восстановления. Физические свойства, а также процессы влаго-, воздухо- и теплопереноса в засоленных почвах имеют свою специфику и отличаются от таковых в незасоленных почвах. С увеличением степени засоления происходит изменение физических свойств почв, определяющих их экологические функции, таких как влаго- и воздухосодержание, агрегатный состав, плотность,

водоудерживающая способность (Дембовецкий и др., 2013). Все мероприятия по борьбе с опустыниванием должны быть научно обоснованы, причем именно с точки зрения изменений почвенных свойств, особенно физических и водно-физических.

Данное исследование посвящено оценке современного физического состояния почвенного покрова и выявлению тенденций трансформации физических свойств почв в условиях опустынивания и засоления. Результаты могут являться научной основой для понимания особенностей и причин изменения физического состояния почв в процессе опустынивания и имеют важное значение для разработки мероприятий по восстановлению экосистем.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

В качестве экспериментальных участков выбраны два геоморфологических объекта в типичном бугровом ландшафте дельты Волги, находящемся в стадии опустынивания: непосредственно бугор Бэра (участок I) и околобугровое пространство (участок II). Выбор участков проведен с учетом положения в рельефе, степени опустынивания и засоления почвы, растительности, почвы. Перепад высот в ландшафте составляет около 16 м.

Климат территории умеренный резко континентальный, с высокими температурами воздуха летом (до +45°C) и низкими зимой (до -35°C). Продолжительность солнечного сияния составляет 2200–2400 часов в год, суммарная солнечная радиация – до 120 ккал см⁻¹. Среднегодовое количество осадков – около 150 мм. Отмечается преобладание восточных и юго-восточных ветров с порывами до 25 м с⁻¹ в весенний и зимний периоды. Основным экологическим фактором является засоление почв. Особенности климата обуславливают значительное превышение испаряемости над количеством осадков. Дефицит почвенной влаги является одним из основных индикаторов опустынивания.

Почвенный покров участка № 1 (brown arid soil) представлен автоморфной зональной бурой аридной солонцеватой и солончаковатой почвой. Для почвенного профиля автоморфных почв бугра характерно наличие солей и уплотненного горизонта. Растительность сильно изрежена (общее проективное покрытие – менее 15 %) и представлена пустынной флорой (мортук восточный, мортук пшеничный, солянка южная, полынь белая и др.). Степень опустынивания сильная.

Почвенный покров участка № 2 (solonshak) представлен полугидроморфной дельтово-аллювиальной луговой маломощной среднесуглинистой солончаковатой почвой (солончак луговой гидроморфный). Для профиля характерны пятна оглеения, железисто-марганцевые примазки,

переувлажнение во время весенне-летних половодий. Общее проективное покрытие растительности – около 50%. Растительность представлена хамефитами и галофитами (спорыш красивый, плоскоплодник льнолистный, бассия иссополистная и др.). Степень опустынивания средняя.

На каждом участке была заложена сетка 500×500 м с шагом 50 м. В узлах сетки закладывались почвенные прикопки ($n = 100$), в которых проводилось изучение почвенных свойств. Почва в каждой точке отбиралась с глубины 0–10 см, 10–20 см и 20–40 см для проведения лабораторных исследований.

Для определения степени опустынивания использована общепринятая классификация (Субрегиональная национальная программа..., 1999). Определение физических свойств проводилось в 3-кратной повторности общепринятыми методами почвоведения и физики почв (Полевые..., 2001). Засоленность почвы определялась по величине плотного остатка, содержание гумуса – по методу И. В. Тюрина (ГОСТ 26213-2021, 2021).

Все полученные результаты определений почвенных свойств были структурированы в выборки данных по участкам и слоям в соответствии с изучаемыми свойствами. Статистический анализ экспериментальных данных проводился в среде программирования R при уровне значимости $p = 0,05$. Сравнительный анализ почвенных свойств в зависимости от участка и состояния почвы выполнялся с помощью описательной статистики. Для оценки различия выборочных средних применялись однофакторный дисперсионный анализ и непараметрический критерий Манна-Уитни, использование которого позволяет избежать проверки каждого свойства на нормальность распределения в силу возможности его несоответствия ей. Результаты визуализированы с использованием диаграммы размаха (Box&Whiskers).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Первоначальная обработка результатов определений свойств почвы проводилась методами

описательной статистики (табл. 1). Это позволяет в целом оценить состояние почв изучаемых участков и провести предварительный сравнительный анализ.

Анализ полученных величин влажности почвы показал (табл. 1, рис. 1а), что почвы участка № 1 характеризуются крайне низкой влагообеспеченностью (17–27% от НВ). Содержание влаги в почве участка № 2 в целом несколько выше, однако влажность поверхностного слоя почвы также очень низкая (около 22% от НВ).

В волжской дельте процессы опустынивания повсеместно связаны с засолением почв. Степень засоления почв выбранных участков оценивалась по величине плотного остатка с использованием общей классификации по количеству солей: незасоленные почвы – менее 0,25%; слабозасоленные – 0,25–0,5%; средnezасоленные – 0,5–1,0%; сильнозасоленные – 1,0–2,0%; солончаки – более 2,0% (Ковда, 1968; Базилевич, Панкова, 1968).

Анализ средних величин показал (табл. 1), что содержание солей в почвах участка № 1 значительно выше. Ареалы засоленных почв неравномерно распространены по территории участков. Наблюдается значительная пространственная вариабельность содержания солей (рис. 1б), особенно на глубине 20–40 см. Следует отметить, что содержание солей в поверхностном слое почвы на участке № 1 выше, чем на участке № 2. Это связано с периодическими процессами засоления/рассоления почв участка № 2 во время половодий. На глубине 20–40 см на обоих участках величина плотного остатка более 2% (солончак). Содержание солей в почвах участка № 1 превышает их содержание в почвах участка № 2. Это связано с реликтовой аккумуляцией солей в профиле зональных почв, которые в настоящее время подвергаются воздействию не грунтовых и паводковых вод, а немногочисленных пресных осадков, количество которых недостаточно для развития процесса рассоления.

Таблица 1. Средние значения почвенных свойств ($n = 100$; $p = 0,05$).

Участок	Слой, см	W, % от НВ	ПО, %	P_b , г см ⁻³	$K_{\text{водопр}}$, м сут. ⁻¹	$P_{\text{рен}}$, МПа	$K_{\text{стр}}$
Участок № 1	0–10	17,60±1,61	1,46±0,19	1,40±0,03	0,47±0,16	1,68±0,06	3,69±0,76
	10–20	27,42±0,86	1,40±0,20	1,40±0,02	0,48±0,15	2,02±0,09	3,84±0,56
	20–40	22,26±1,93	2,80±0,48	1,44±0,01	0,62±0,18	1,96±0,1	5,37±1,39
Участок № 2	0–10	21,96±0,37	0,97±0,26	1,32±0,04	1,25±0,39	1,69±0,05	2,78±0,50
	10–20	54,89±5,86	1,12±0,37	1,40±0,03	0,79±0,22	1,97±0,09	3,19±0,79
	20–40	63,33±4,93	2,02±0,40	1,39±0,02	1,05±0,27	1,91±0,11	4,49±1,28

Обозначения: W, % – влажность почвы; ПО, % – содержание солей по величине плотного остатка; P_b , г см⁻³ – плотность почвы; K_f , м сут.⁻¹ – коэффициент фильтрации; $K_{\text{стр}}$, % – коэффициент структурности почвы; $P_{\text{рен}}$, МПа – сопротивление пенетрации.

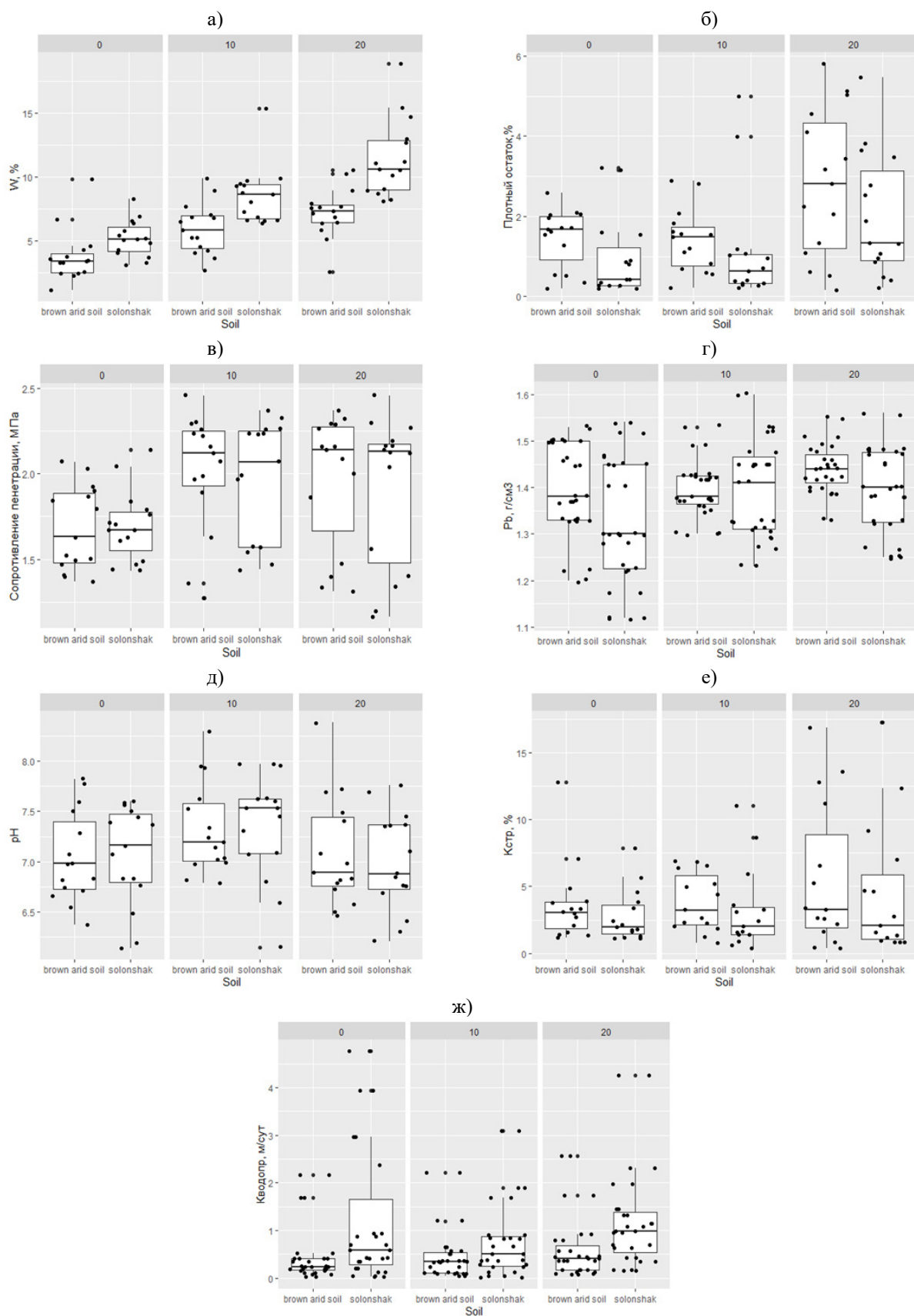


Рис. 1. Диаграммы размаха физических свойств почвы:
 (а) влажность, W, %; (б) содержание солей по величине плотного остатка ПО, %;
 (в) сопротивление пенетрации, P_{pen} , МПа; (г) плотность, ρ_b , г/см³; (д) pH; (е) коэффициент структурности, К_{стр}, %; (ж) коэффициент фильтрации $K_{\text{водпр}}$, м/сут⁻¹;

Важное значение в функционировании опустыненных почв имеют структурно-механические параметры: плотность почвы (P_b) и сопротивление пенетрации (P_{pen}), отражающие водо- и воздухопроницаемость почвы и определяющие предел развития корневых систем растений. По данным большинства исследователей, оптимум плотности для суглинистых почв находится в области от 1,0 до 1,3 г см⁻³ (для легкосуглинистых – до 1,4 г см⁻³) (Бондарев, 1981).

Сравнение почв участков по величине плотности (табл. 1) позволило выявить различия между автоморфными и гидроморфными почвами. В частности, плотность почвы участка № 1 в среднем ($1,41 \pm 0,01$ г см⁻³) больше, чем на втором участке ($1,37 \pm 0,02$ г см⁻³). С глубины 10 см плотность автоморфных почв участка № 1 незначительно увеличивается. На участке № 2 отмечено значительное увеличение плотности с глубиной (до $1,40 \pm 0,03$ г см⁻³). Из рис. 1г видно, что наименьшие значения плотности почвы ($1,3$ – $1,4$ г см⁻³) и наибольшая вариабельность приурочены к поверхностным слоям. Растительный покров обуславливает меньшую плотность ($1,32 \pm 0,04$ г см⁻³) поверхностного слоя почвы участка № 2 (solonshak). Плотность почвы возрастает до $1,40 \pm 0,03$ г см⁻³ в слое 10–20 см и до $1,39 \pm 0,03$ г см⁻³ в слое 20–40 см при снижении вариабельности значений. При этом следует отметить значительное увеличение сопротивления пенетрации (более 1,9 МПа). Оценку показателей плотности сложения почв имеет смысл проводить в совокупности с величинами сопротивления пенетрации (рис. 1в). Сопротивление пенетрации определялось микропенетрометром МВ-2 на глубинах 0, 10 и 20 см.

Критические значения сопротивления пенетрации и плотности сложения, свидетельствующие о переуплотнении почв, составляют: для глинистых почв – 1,0 МПа и 1,40 г см⁻³; для суглинистых – 1,5 МПа и 1,55 г см⁻³; для песчаных – 2,6 МПа и 1,75 г см⁻³ (Coder, 2007).

Оценка взаимосвязи сопротивления пенетрации и плотности почвы (Кормилицына, Бондаренко, 2016) показала, что поверхностные слои почв исследуемых участков относятся к разряду очень плотных, а с глубины 10 см почвы могут определяться как чрезвычайно плотные. Повышенные величины плотности и сопротивления пенетрации автоморфных почв позволяют предположить, что в иллювиальных горизонтах начались процессы осолонцевания почв и аккумуляции солей под действием немногочисленных осадков.

Повышенные величины сопротивления пенетрации лугового солончака (участок № 2) также обусловлены аккумуляцией солей при интенсивном испарении влаги с поверхности почвы и наличием иллювиальных плотных горизонтов. Значительная вариабельность величин сопротивления пенетрации на глубине 20–40 см связана с периодическим переувлажнением почв и развитием процессов оглеения.

Одним из базовых параметров, используемых при оценке физического состояния почвы, является ее структурное состояние. Статистический анализ метаданных показал значительное влияние структуры почвы на ее фильтрационные свойства (Basset et al., 2023).

Структурное состояние почвы оценивалось по величине коэффициента структурности ($K_{стр}$). Результаты показали, что почвы обоих участков в целом характеризуются хорошим структурным состоянием (табл. 1, рис. 1е). Имеются лишь отдельные участки с неудовлетворительным структурным состоянием.

Влагопроводящие свойства почв оценивались по коэффициенту водопроницаемости ($K_{водопр}$) с использованием разделения почв по величине водопроницаемости (за первый час, м сут⁻¹), предложенного Н. А Качинским: более 1000 см сут⁻¹ – провальная; 1000–500 – излишне высокая; 500–100 – наилучшая; 100–70 – хорошая; 70–30 – удовлетворительная, менее 30 – неудовлетворительная. Анализ результатов показал, что в целом водопроницаемость почв участков неудовлетворительная (табл. 1). В среднем на участке № 1 величины $K_{водопр}$ – менее 1 м сут⁻¹, на участке № 2 – менее 2 м сут⁻¹.

Определенный интерес представляет наличие или отсутствие значимых различий в физическом состоянии почв, находящихся в разных геоморфологических условиях при засолении и опустынивании. Для установления различий между средними показателями состояния почв участков и по слоям опробования применялся однофакторный дисперсионный анализ (табл. 2, 3).

Установлено, что статистически значимые различия между исследованными участками имеются только по средним величинам влажности и водопроницаемости почвы (табл. 2).

Для установления различий в физическом состоянии почв между участками по слоям опробования использовался непараметрический критерий Манна-Уитни (табл. 3).

Таблица 2. Уровень достоверности различий ($p = 0,05$) средних величин физических свойств почв участков № 1 и № 2

Свойство	W, %	P_b , г см ⁻³	$K_{водопр}$, м сут ⁻¹	$K_{стр}$, %	ПО, %	P_{pen} , МПа
Уровень значимости	3,54e-05*	0,065	0,006*	0,256	0,077	0,697

Примечание: * – уровень значимости $p < 0,05$.

Обозначения: W, % – влажность почвы; ПО, % – содержание солей по величине плотного остатка; P_b , г см⁻³ – плотность почвы; $K_{водопр}$, м сут⁻¹ – коэффициент фильтрации; $K_{стр}$, % – коэффициент структурности почвы; P_{pen} , МПа – сопротивление пенетрации.

Таблица 3. Уровень достоверности различий ($p = 0,05$) средних величин физических свойств почв участков № 1 и № 2 по слоям опробования

Слой, см	W, %	P_b , г см ⁻³	$K_{\text{водопр}}$, м сут ⁻¹	$K_{\text{стр}}$, %	ПО, %	$P_{\text{реп}}$, МПа
Уровень значимости						
0–10	0,010*	0,129	0,081	0,309	0,038*	0,933
10–20	0,004*	0,983	0,245	0,221	0,051	0,900
20–40	1,55e-05*	0,176	0,042*	0,506	0,237	0,693

Примечание: * – уровень значимости $p < 0,05$.

Обозначения: W, % – влажность почвы; ПО, % – содержание солей по величине плотного остатка; P_b , г см⁻³ – плотность почвы; $K_{\text{водопр}}$, м сут⁻¹ – коэффициент фильтрации; $K_{\text{стр}}$, % – коэффициент структурности почвы; $P_{\text{реп}}$, МПа – сопротивление пенетрации.

Установлены значимые различия по влагообеспеченности почвы в слое 0–40 см. Также выявлены статистически значимые различия между поверхностными слоями почв участков по содержанию солей и слоем 20–40 см по влагопроводящим свойствам.

Деградация уязвимой дельтовой экосистемы, вызванная деятельностью человека и климатическими изменениями, представляет собой сложный комплексный процесс, связанный в первую очередь с деградацией почвы и характеризующийся развитием опустынивания засоленных почв. Считается, что деградация почвы усиливается с увеличением степени опустынивания, однако результаты данного исследования показывают, что при этом ухудшаются не все физические свойства. Так, в результате статистического анализа не выявлено существенной разницы в структурном состоянии почв (средний диапазон $K_{\text{стр}}$ 3,18–3,37) и в плотности почвы (средний диапазон 1,37–1,39 г см⁻³) между различными степенями галоморфного опустынивания, что позволяет предположить, что физические свойства почвы зависят также от засоленности материнской породы.

Формирование осолонцованных опустыненных почв на склонах бугров Бэра в дельте Волги обусловлено уровнем водоемов (ильменей) в межбугровых понижениях. При понижении уровня воды в водотоках дельты Волги и при увеличении индекса аридности происходит уменьшение площади поверхности внутренних водоемов. По мере высыхания ильменей и сокращения их площади происходит удаление почв склонов от водоемов и понижение уровня грунтовых вод вплоть до полного прекращения их влияния на почвообразовательные процессы. Такие почвы, имеющие исторически сформированный солевой горизонт, вступают в стадию рассоления под действием немногочисленных атмосферных осадков. Вместо солевых горизонтов формируются осолонцованные, наблюдаются значительное переуплотнение почвы, резкое ухудшение влагопроводящих свойств и снижение влагообеспеченности. Переход в стадию солонцов при имеющемся количестве осадков не представляется возможным.

Таким образом, эволюция почв в дельтовых ландшафтах в условиях засоления и опустынивания состоит из следующих стадий: солончаки гидроморфные (прибрежная зона ильменей) → солончаки полугидроморфные (околобугровое

пространство) → солончаки полуавтоморфные (шлейф бугра) → солончаки автоморфные (подошва бугров) → почвы пустынного типа (вершина бугра). На последних этапах солончаковые процессы, обусловленные гидроморфными условиями, сменяют процессы осолонцевания. Продолжение развития подобных процессов приводит к трансформации полугидроморфных почв в полуавтоморфные и далее в автоморфные, при этом происходит переход от средней степени опустынивания к сильной.

Происходящие трансформации почвенного покрова сопровождаются интенсивным развитием опустынивания и изменением ряда таких показателей физического состояния почв, как содержание почвенной влаги, влагопроводимость, уплотненность и содержание солей. Увеличение ареалов опустыненных почв может привести к экологическому бедствию в регионе. Оценка рисков опустынивания земель является приоритетом устойчивого развития засушливых полупустынных районов.

ВЫВОДЫ

Результаты исследования показали, что засоленные почвы в условиях опустынивания имеют неудовлетворительное физическое состояние. Почвы характеризуются крайне низкой влагообеспеченностью, плохими влагопроводящими свойствами и значительным переуплотнением иллювиальных горизонтов. При этом структурное состояние сохраняется в пределах оптимального.

Результаты исследования позволили установить, что наиболее чувствительными к происходящим трансформациям почвенного покрова показателями являются засоленность поверхностного слоя, влагообеспеченность почвы, сопротивление пенетрации и влагопроводящие свойства почвы. Данные свойства могут использоваться для идентификации степени опустынивания и деградации почв в аридных условиях.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках темы № 05/ВИП ГЗ (Соглашение № 169-15-2023-001 от 01.03.2023 года) по теме «Создание и развитие системы мониторинга современного состояния опустыненных земель, моделирования и прогнозирования развития процессов опустынивания территорий, восстановления пострадавших земель аридных, субаридных и сухих субгумидных регионов в обеспечении действий по борьбе с опустыниванием (ДБО)».

Список литературы

- Бабаев А. Г. Аридные территории СССР и их производительные силы // Освоение аридных территорий и борьба с опустыниванием: комплексный подход. М.: ЮНЕП-ЮНЕПКОМ-ЦМП, 1986. С. 120–142.
- Базилевич Н. И., Панкова Е. И. Опыт классификации почв по засолению // Почвоведение. 1968. № 11. С. 3–16.
- Бондарев А. Г. Физические свойства почв как теоретическая основа прогноза их уплотнения сельскохозяйственной техникой // Влияние сельскохозяйственной техники на почву. Науч. Тр. Почв. ин-та им. В. В. Докучаева. М., 1981. 278 с.
- Гидрологический режим водотоков низовьев дельты Волги и его влияние на природные экосистемы. Сборник материалов круглого стола (центральный кордон Дамчикского участка, 3 сентября 2021 г). Астрахань, 2021. 60 с.
- ГОСТ 26213-2021. Межгосударственный стандарт. Почвы. Методы определения органического вещества. М.: Российский институт стандартизации, 2021. 7 с.
- Дорошенко В. В. Развитие опустынивания на юге России // Электронный научно-образовательный журнал ВГСПУ «Грани познания». 2023. № 1 (84). С. 7–15.
- Дембовецкий А. В., Шейн Е. В., Милановский Е. Ю., Федотова А. В., Колокольников В. В., Харитонов Г. В. Засоление и пространственная изменчивость физических свойств почв ландшафтов Бэровских бугров Прикаспийской низменности // Биогеохимия и гидроэкология наземных и водных экосистем / Отв. ред. П. В. Ивашов. Хабаровск: Институт водных и экологических проблем ДВО РАН, 2013. Вып. 20. С. 88–109.
- Ковда В. А. Номенклатура и классификация засоленных почв // Почвы аридной зоны. М.: Наука, 1968. С. 11–24.
- Ковда В. А. Проблемы борьбы с опустыниванием и засолением орошаемых почв. М.: Колос, 1984. 304 с.
- Кормилицына О. В., Бондаренко В. В. Мониторинг состояния почвенно-грунтовых условий озелененных территорий // Лесной Вестник. 2016. № 1. С. 86–89.
- Национальный доклад «Глобальный климат и почвенный покров России: проявление засухи, меры предупреждения, борьбы, ликвидации последствий и адаптационные мероприятия (сельское и лесное хозяйство)» / Под ред. Р. С.-Х. Эдельгериева. М.: ООО «Издательство МБА», 2021. Т. 3. 700 с.
- Полевые и лабораторные методы исследования физических свойств и режимов почв: Методическое руководство / Под ред. Е. В. Шеина. М.: Изд-во МГУ, 2001. 200 с.
- Проблемы опустынивания. Перевод с английского. М.: Госкомприроды СССР, 1989. Вып. 7. С. 33.
- Розанов Б. Г. Проблемы деградации засушливых земель мира и международное сотрудничество по борьбе с опустыниванием // Почвоведение. 1977. № 8. С. 5–16.
- Розанов Б. Г., Зонн И. С. План действий по борьбе с опустыниванием в СССР: оценка, мониторинг, предупреждение и борьба с ним // Проблемы освоения пустынь. 1981. № 6. С. 22–31.
- Субрегиональная национальная программа действий по борьбе с опустыниванием (НПДБО) для юго-востока Европейской части Российской Федерации / Под ред. К. Н. Кулика. Волгоград: ВНИАЛМИ, 1999. 314 с.
- Щерба Т. Э., Гасанов А. С. Понятие «опустынивание почв» и некоторые подходы к его трактовке // Ученые записки Казанской государственной академии ветеринарной медицины им. Н. Э. Баумана. 2015. Т. 224. С. 274–279.
- Basset C., Najm M.A., Ghezzehei T., Hao X., Daccache A. How does soil structure affect water infiltration? A meta-data systematic review // Soil and Tillage Research. 2023. Vol. 226. <https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105577>
- Coder K.D. Soil Compaction Stress & Trees: Symptoms, Measures, Treatments. Warnell School of Forestry & Natural Resources University of Georgia, 2007. 99 p.
- He S., Xiong K., Song S., Chi Y., Fang J., He C. Research Progress of Grassland Ecosystem Structure and Stability and Inspiration for Improving Its Service Capacity in the Karst Desertification Control // Plants. 2023. Vol. 12 (4). 770 p. <https://doi.org/10.3390/plants12040770>
- Lamaamri M., Lghabi N., Ghazi A. et al. Evaluation of Desertification in the Middle Moulouya Basin (North-East Morocco) Using Sentinel-2 Images and Spectral Index Techniques // Earth Syst Environ. 2023. № 7. 473 p. <https://doi.org/10.1007/s41748-022-00327-9>
- Oğlu M.H.L., Oğlu Q.M.A.F. Azərbaycanın Şəki-Zaqatala Bölgəsinin Landşaft Qurşaqlarında Biogeokimyəvi Proseslərin Səciyyəvi Xüsusiyyətləri // Endless light in science. 2023. № 1. pp. 506-515.
- Rajendran S., Kuwari H., Sadooni F.N., Nasir S., Ghrefat H., Govil H. Remote sensing of desertification and study of temporal variability of aeolian deposits in parts of the Arabian Desert for sustainable development in an arid environment // Environmental Research. 2023. pp. 116279. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.116279>
- Wei Q., Ling L., Chai C.S., Zhang G.Z., Yan P.B., Tao J.X., Xue R. Soil physical and chemical properties in forest succession process in Xinglong Mountain of Gansu // Acta Ecologica Sinica. 2012. Vol. 32. № 15. pp. 4700–4713.
- Yi Y., Shi M., Wu J., Yang N., Zhang C., Yi X. Spatio-Temporal Patterns and Driving Forces of Desertification in Otindag Sandy Land, Inner Mongolia, China, in Recent 30 Years // Remote Sensing. 2023. Vol. 15(1). pp. 279. <https://doi.org/10.3390/rs15010279>

References

- Babayev A. G. *Aridnyye territorii SSSR i ikh proizvoditel'nyye sily* [Arid territories of the USSR and their productive forces] // Osvoeniye aridnykh territoriy i bor'ba s opustynivaniyem: kompleksnyy podkhod. M.: YuNEP-YuNEPKOM-TsMP, 1986, pp. 120–142.
- Bazilevich N. I., Pankova Ye. I. Opyt klassifikatsii pochv po zasoleniyu [Experience of soil classification by salinity] // *Pochvovedeniye*, 1968, no. 11, pp. 3–16.
- Bondarev A. G. *Fizicheskiye svoystva pochv kak teoreticheskaya osnova prognoza ikh uplotneniya sel'skokhozyaystvennoy tekhnikoy* [Physical properties of soils as a theoretical basis for predicting their compaction by agricultural machinery] // Vliyaniye sel'skokhozyaystvennoy tekhniki na pochvu. Nauch. Tr. Pochv. In-ta im. V.V. Dokuchayeva. M., 1981, 278 p.

- Gidrologicheskiy rezhim vodotokov nizov'ye del'ty Volgi i yego vliyaniye na prirodnyye ekosistemy [Hydrological regime of watercourses in the lower reaches of the Volga delta and its impact on natural ecosystems] // Sbornik materialov kruglogo stola (*tsestral'nyy kordon Damchikskogo uchastka, 3 sentyabrya 2021 g.*). Astrakhan', 2021, 60 p.
- GOST 26213-2021. Mezhhgosudarstvennyy standart. Pochvy. Metody opredeleniya organicheskogo veshchestva [State Standard 26213-2021. Interstate standard. Soils. Methods for determining organic matter]. M.: Rossiyskiy institut standartizatsii, 2021, 7 p.
- Doroshenko V. V. Razvitiye opustynivaniya na yuge Rossii [The development of desertification in the south of Russia] // *Elektronnyy nauchno-obrazovatel'nyy zhurnal VGSPU «Grani poznaniya»*, 2023, no. 1(84), pp. 7–15.
- Dembovetskiy A. V., Shein Ye. V., Milanovskiy Ye. Yu., Fedotova A. V., Kolokol'tsev V. V., Kharitonova G. V. *Zasoleniye i prostranstvennaya izmenchivost' fizicheskikh svoystv pochv landshaftov berovskikh bugrov Prikaspiyskoy nizmennosti* [Salinization and spatial variability of the physical properties of soils in the landscapes of Baer hillocks in the Pre-Caspian lowland] // *Biogeokhimiya i gidroekologiya nazemnykh i vodnykh ekosistem* / *Otv. red. P. V. Ivashov*. Khabarovsk: Institut vodnykh i ekologicheskikh problem DVO RAN, 2013, iss. 20, pp. 88–109.
- Kovda V. A. *Nomenklatura i klassifikatsiya zasolennykh pochv* [Nomenclature and classification of saline soils] // *Pochvy aridnoy zony*. M.: Nauka, 1968, pp. 11–24.
- Kovda V. A. *Problemy bor'by s opustynivaniyem i zasoleniyem oroshayemykh pochv* [Problems of combating desertification and salinization of irrigated soils]. M.: Kolos, 1984, 304 p.
- Kormilitsyna O. V., Bondarenko V. V. Monitoring sostoyaniya pochvenno-gruntovykh usloviy ozelenennykh territoriy [Monitoring the state of soil and ground conditions of green areas] // *Lesnoy Vestnik*, 2016, no. 1, pp. 86–89.
- Natsional'nyy doklad «Global'nyy klimat i pochvennyy pokrov Rossii: proyavleniye zasukhi, mery preduprezhdeniya, bor'by, likvidatsii posledstviy i adaptatsionnyye meropriyatiya (sel'skoye i lesnoye khozyaystvo)» [National report «Global climate and soil cover in Russia: manifestation of drought, prevention, control, mitigation and adaptation measures (agriculture and forestry)»] / *Pod red. R. S.-Kh. Edel'geriyeva*. M.: OOO «Izdatel'stvo MBA», 2021, vol. 3, 700 p.
- Polevyie i laboratornyye metody issledovaniya fizicheskikh svoystv i rezhimov pochv*: Metodicheskoye rukovodstvo [Field and laboratory methods for studying the physical properties and regimes of soils: Methodological guide] / *Pod red. Ye. V. Sheina*. M.: Izd-vo MGU, 2001, 200 p.
- Problemy opustynivaniya* [Desertification problems]. *Perevod s angliyskogo*. M.: Goskomprirody SSSR, 1989, iss. 7, p. 33.
- Rozanov B. G. Problemy degradatsii zasushlivykh zemel' mira i mezhdunarodnoye sotrudnichestvo po bor'be s opustynivaniyem [Problems of degradation of drylands of the world and international cooperation to combat desertification] // *Pochvovedeniye*, 1977, no. 8, pp. 5–16.
- Rozanov B. G., Zonn I. S. Plan deystviy po bor'be s opustynivaniyem v SSSR: otsenka, monitoring, preduprezhdeniye i bor'ba s nim [Action plan to combat desertification in the USSR: assessment, monitoring, prevention and control] // *Problemy osvoyoeniya pustyn'*, 1981, no. 6, pp. 22–31.
- Subregional'naya natsional'naya programma deystviy po bor'be s opustynivaniyem (NPDBO) dlya yugo-vostoka Yevropeyskoy chasti Rossiyskoy Federatsii* [Subregional national action program to combat desertification for the south-east of the European part of the Russian Federation] / *Pod red. K.N. Kulika*. Volgograd: VNIALMI, 1999, 314 p.
- Shcherba T. Ye., Gasanov A. S. Ponyatiye «opustynivaniye pochv» i nekotoryye podkhody k yego traktovke [The concept of «desertification of soils» and some approaches to its interpretation] // *Uchenyye zapiski Kazanskoy gosudarstvennoy akademii veterinarnoy meditsiny im. N.Ye. Baumana*, 2015, vol. 224, pp. 274–279.
- Basset C., Najm M.A., Ghezzehei T., Hao X., Daccache A. How does soil structure affect water infiltration? A meta-data systematic review // *Soil and Tillage Research*. 2023. Vol. 226. <https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105577>
- Coder K.D. Soil Compaction Stress & Trees: Symptoms, Measures, Treatments. Warnell School of Forestry & Natural Resources University of Georgia, 2007. 99 p.
- He S., Xiong K., Song S., Chi Y., Fang J., He C. Research Progress of Grassland Ecosystem Structure and Stability and Inspiration for Improving Its Service Capacity in the Karst Desertification Control // *Plants*. 2023. Vol. 12 (4). 770 p. <https://doi.org/10.3390/plants12040770>
- Lamaamri M., Lghabi N., Ghazi A. et al. Evaluation of Desertification in the Middle Moulouya Basin (North-East Morocco) Using Sentinel-2 Images and Spectral Index Techniques // *Earth Syst Environ*. 2023. № 7. 473 p. <https://doi.org/10.1007/s41748-022-00327-9>
- Oğlu M.H.L., Oğlu Q.M.A.F. Azərbaycanın Şəki-Zaqatala Bölgəsinin Landşaft Qurşaqlarında Biogeokimyəvi Proseslərin Səciyyəvi Xüsusiyyətləri // *Endless light in science*. 2023. № 1. pp. 506-515.
- Rajendran S., Kuwari H., Sadooni F.N., Nasir S., Ghrefat H., Govil H. Remote sensing of desertification and study of temporal variability of aeolian deposits in parts of the Arabian Desert for sustainable development in an arid environment // *Environmental Research*. 2023. pp. 116279. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.116279>
- Wei Q., Ling L., Chai C.S., Zhang G.Z., Yan P.B., Tao J.X., Xue R. Soil physical and chemical properties in forest succession process in Xinglong Mountain of Gansu // *Acta Ecologica Sinica*. 2012. Vol. 32. № 15. pp. 4700–4713.
- Yi Y., Shi M., Wu J., Yang N., Zhang C., Yi X. Spatio-Temporal Patterns and Driving Forces of Desertification in Otindag Sandy Land, Inner Mongolia, China, in Recent 30 Years // *Remote Sensing*. 2023. Vol. 15(1). pp. 279. <https://doi.org/10.3390/rs15010279>