

УДК 531.4

## КАК ТРАНСФОРМИРОВАЛИСЬ КАШТАНОВЫЕ ПОЧВЫ ДЖАНЫБЕКСКОЙ РАВНИНЫ В РЕЗУЛЬТАТЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА?

© 2024 г. О. О. Плотникова<sup>a, \*</sup>, М. П. Лебедева<sup>a</sup>, А. В. Колесников<sup>a, b</sup>,  
А. Е. Каганова<sup>a</sup>, П. Р. Цымбарович<sup>a</sup>, Д. С. Комкова<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Почвенный институт им. В.В. Докучаева, Пыжевский пер., 7, стр. 2, Москва, 119017 Россия

<sup>b</sup>Институт лесоведения РАН, ул. Советская, 21, п/о Успенское, Московская область, 143030 Россия

\*e-mail: mrs.plotnikova@mail.ru

Поступила в редакцию 26.04.2024 г.

После доработки 10.07.2024 г.

Принята к публикации 10.07.2024 г.

Время с середины 1970-х гг. выделяется как период современного глобального потепления, а 1976 г. условно принят за его начало. Территории южных и засушливых районов особенно чувствительны к климатическим изменениям, поэтому целью работы являлось выявить особенности потепления климата на территории Джаныбекской равнины и изменения свойств почв, связанные с установленными климатическими трендами. Объектом исследования является микрокатена каштановых солонцеватых почв (Someric Calcic Luvic Kastanozem (Loamic, Sodic) и Mollic Salic Calcic Solonetz (Loamic)) на территории Джаныбекского стационара Института лесоведения РАН. Обобщены данные о климате изучаемой территории за период 1914–2021 гг. Выявлено, что в период 1976–2021 гг. по сравнению с периодом 1914–1975 гг. увеличились: среднегодовые температуры воздуха на 1°C и  $\Sigma p$  (сумма осадков) на 18,3 мм; среднегодовое количество осадков на 1.5°C; среднегодовое количество осадков на 39.5 мм. С применением полевых, микроморфологических, химических методов установлено, что за последние 54 года уровень грунтовых вод поднялся на 1 м, минерализация и засоленность вод увеличилась минимум в 2 раза, усилилось засоление и окисление почв, увеличилась глубина их проработки почвенной мезофауной и глубина проникновения корней, что пока не отразилось в содержании органического углерода. При сохранении выявленных трендов климата ожидается, что изученные почвы станут засоленными и карбонатными с поверхности, а также увеличится содержание и запас углерода, однако для подтверждения таких изменений требуется продолжение и расширение стационарных наблюдений.

**Ключевые слова:** микроморфология почв, засоленные почвы, сухостепная зона, аридные почвы, глобальное потепление

**DOI:** 10.31857/S0032180X24120132, **EDN:** JCNCCS

### ВВЕДЕНИЕ

Согласно Третьему оценочному докладу об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации [27], период с середины 1970-х гг. выделяется как период современного глобального потепления, а 1976 г. условно принят за его начало. Причем потепление происходит не только в среднем по территории России, но и на региональном уровне, во всех физико-географических регионах и федеральных округах. Относительно линейных трендов потепления климата (°C/10 лет) по сезонам доклад сообщает, что они положительны и статистически значимы на

1%-ном уровне на ЕТР для всех сезонов за период 1976–2020 гг. Что касается осадков, то на Европейской территории России в целом за указанный период времени значительно увеличилось количество осадков зимнего и весеннего периода и незначительно, но уменьшилось количество осадков летнего и осеннего периода.

Поскольку почвы являются сложными комплексными системами, находящимися в тесной взаимосвязи с остальными компонентами ландшафта, изменение климата не может не оказывать влияния и на почвенные свойства [42]. С учетом установленного изменения климата,

неудивительно, что его влияние на почвенные свойства привлекает внимание исследователей, однако оно преимущественно сосредоточено на секвестрационной функции почв [44, 45] и их плодородии в агроландшафтах [31, 33]. В то же время территории южных и засушливых районов особенно чувствительны к климатическим изменениям [32], а микростроение почв фиксирует их отклик на изменение любого внешнего воздействия [26]. Разрешающая способность записи климатического отклика в микростроении может быть от нескольких лет до сотен тысяч. Таким образом, целесообразно использовать микростроение почв совместно с накопленными данными об их химических свойствах для анализа направления трансформации почв в условиях активно меняющегося климата. Почвы Джаныбекского стационара давно являются объектами изучения, в том числе особенностей микростроения целинных и мелиорируемых почв солонцовых комплексов [12, 13, 36].

В данной работе преследовали две цели: 1) выявить особенности потепления климата на территории Джаныбекской равнины и 2) вычленив изменения свойств почв, связанные с описанными климатическими трендами. Цели определили постановку следующих задач: 1) сбор и анализ климатических данных для характеризуемой территории за максимально доступный период наблюдений; 2) анализ данных о химических свойствах почв солонцового комплекса; 3) изучение макро- и микростроения почв солонцового комплекса.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объектом исследования является микрокатена светло-каштановых почв, в разной степени солонцеватых, расположенная в солонцовом комплексе, включающем также солонец и лугово-каштановую почву, между I и II лентами гослесополосы Чапавск–Владимировка на территории Джаныбекского стационара Института лесоведения РАН. Траншея длиной 3 м заложена в 2022 г. на микросклоне, превышение между верхней и нижней точкой – 4,6 см (рис. 1).

Растительность пустынно-степная: мятлик луковичный (*Poa bulbosa* L.), кохия простертая (*Kochia prostrata* (L.) Shrad.), житняк гребенчатый (*Agropyron cristatum* (L.) Gaertn.), полынь австрийская (*Artemisia austriaca* Jacq.), кермек каспийский (*Limonium caspium* (Willd.) P.Fourn.), трехреберник непахучий (*Tripleurospermum inodorum* (L.) Sch.Bip.), проективное покрытие 80%. Смена растительности на протяжении трехметровой траншеи практически не была заметна, только в конце траншеи в растительном покрове становится немного больше доля трехреберника.

Полевое описание проводили по отдельным участкам передней стенки траншеи, соответству-

ющим разрезам, описанным Девятыми в 1968 г. [16]. Для описания выбирали участки шириной 40 см: разрез 5-22 – 0–40 см, разрез 4-22 – 130–170 см, разрез 3-22 – 260–300 см трехметровой траншеи. Полевое описание проводили в соответствии с Руководством по описанию почв FAO [20]. Цвет почвы определяли по шкале Манселла на свежих кусочках почвы с естественной влажностью, вырезанных из стенки разреза, не дожидаясь высыхания [37]. Горизонты индексировали по классификации и диагностике почв России с учетом последних дополнений [9, 28, 29], литологическую неоднородность обозначали арабскими цифрами перед основным индексом горизонта в соответствии с [20]. Глубина вскипания, определенная в поле: разрез 5-22 – 16(20) см слабое, с волнистой границей, 34 см сплошное бурное; разрез 4-22 – 19 см слабое, пятнами, 33 см бурно пятнами, 40 см сплошное очень бурное; разрез 3-22 – 30 см бурно, со слабоволнистой границей, 40 см очень бурное.

Для характеристики изменения климата исследуемой территории объединены ранее опубликованные данные наблюдений за погодой на Эльтонской (1914–1939, 1946–1951 гг.) [16] и Джаныбекской метеостанциях (1951–2021 гг.) [39, 43]. Чтобы оценить изменение климата исследуемой территории с 1914 по 2021 гг. проанализировали коэффициенты уравнений линейной аппроксимации графиков средней температуры, суммы осадков, коэффициента увлажнения по Иванову [7].

Большинство физико-химических анализов выполняли с использованием рыхлых образцов, отобранных с глубины 0–5, 5–10 см и далее через 10 см до глубины 2 м (если не указано иное). Содержание органического углерода определялось по ГОСТ 26213–2021 до глубины в 1 м. Состав обменных катионов определялся по методу Пфедффера в модификации Молодцова и Игнатовой [15]. Состав легкорастворимых солей определяли в водной вытяжке следующими методами: ионы  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  – титриметрически [2];  $\text{SO}_4^{2-}$  – по методу Комаровского [4];  $\text{K}^+$  и  $\text{Na}^+$  – методом пламенной фотометрии [2]. Гранулометрический состав определяли по методу Качинского [8]. Шлифы изготовлены в Почвенном институте М.А. Ломоносова. Микроморфологические исследования проводили с использованием поляризационного микроскопа нового поколения Olympus BX51 с цифровой камерой Olympus DP26 (оборудование Центра коллективного пользования научным оборудованием “Функции и свойства почв и почвенного покрова” ФГБНУ ФИЦ “Почвенный институт им. В.В. Докучаева”). Визуализацию и измерения деталей микростроения проводили с помощью Stream Basic. Элементы микростроения описывали согласно международной терминологии [5, 46].



## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

**Климат.** В предыдущей статье, посвященной почвам этого участка Джаныбекской равнины [16], оценивали климат периода 1914–1968 гг. Теперь решили оценить изменение климата на данной территории за период 1976–2021 гг., поскольку по данным Третьего оценочного доклада об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации [27], именно 1976 г. считается годом начала современного глобального потепления. Для оценки изменений климата были построены графики многолетнего хода (1914–2021 гг.) среднегодовых значений температуры воздуха, осадков и коэффициента Иванова (рис. 2). Все графики были линейно аппроксимированы, для аппроксимации выбирали периоды: 1914–2021 гг. – весь период наблюдений; 1914–1975 гг. – период до начала глобального потепления; 1976–2021 гг. – период глобального потепления. Результаты аппроксимации представлены в приложении (табл. S1–S3). Нетрудно заметить, что коэффициент детерминации ( $R^2$ ) линейной аппроксимации только для графика температуры воздуха в теплый период года 1976–2021 гг. превысил 0.5, т.е. можно сказать, что линейным трендом многолетний ход климатических показателей изучаемой территории не описывается. Для подтверждения этого утверждения мы провели линейную аппроксимацию графиков температуры воздуха, осадков и коэффициента Иванова, сглаженных 5-летними медианами, для периодов 1958–2021 гг., 1959–2021 гг., ..., 2020–2021 гг. Оказалось, что многолетний ход средней температуры воздуха за год убедительно аппроксимируется линейным трендом ( $R^2 \geq 0.7$ ) только для периодов 1958, 1959, 1960–2021 гг. и 2009, 2010–2021 гг. (табл. S4). Многолетний ход средней температуры воздуха за теплый период года не аппроксимируется линейным трендом (табл. S5). Многолетний ход средней температуры воздуха за холодный период года аппроксимируется линейным трендом только для периодов 2009, 2010, 2011–2021 гг. (табл. S6). Многолетний ход суммы осадков за год и за теплый период года не аппроксимируется линейным трендом (табл. S7, S8). Многолетний ход суммы осадков за холодный период года аппроксимируется линейным трендом только для периодов 2013, 2014, 2015, 2016, 2017–2021 гг. (табл. S9). Многолетний ход коэффициента Иванова за год и за теплый период года не аппроксимируется линейным трендом (табл. S10, S11).

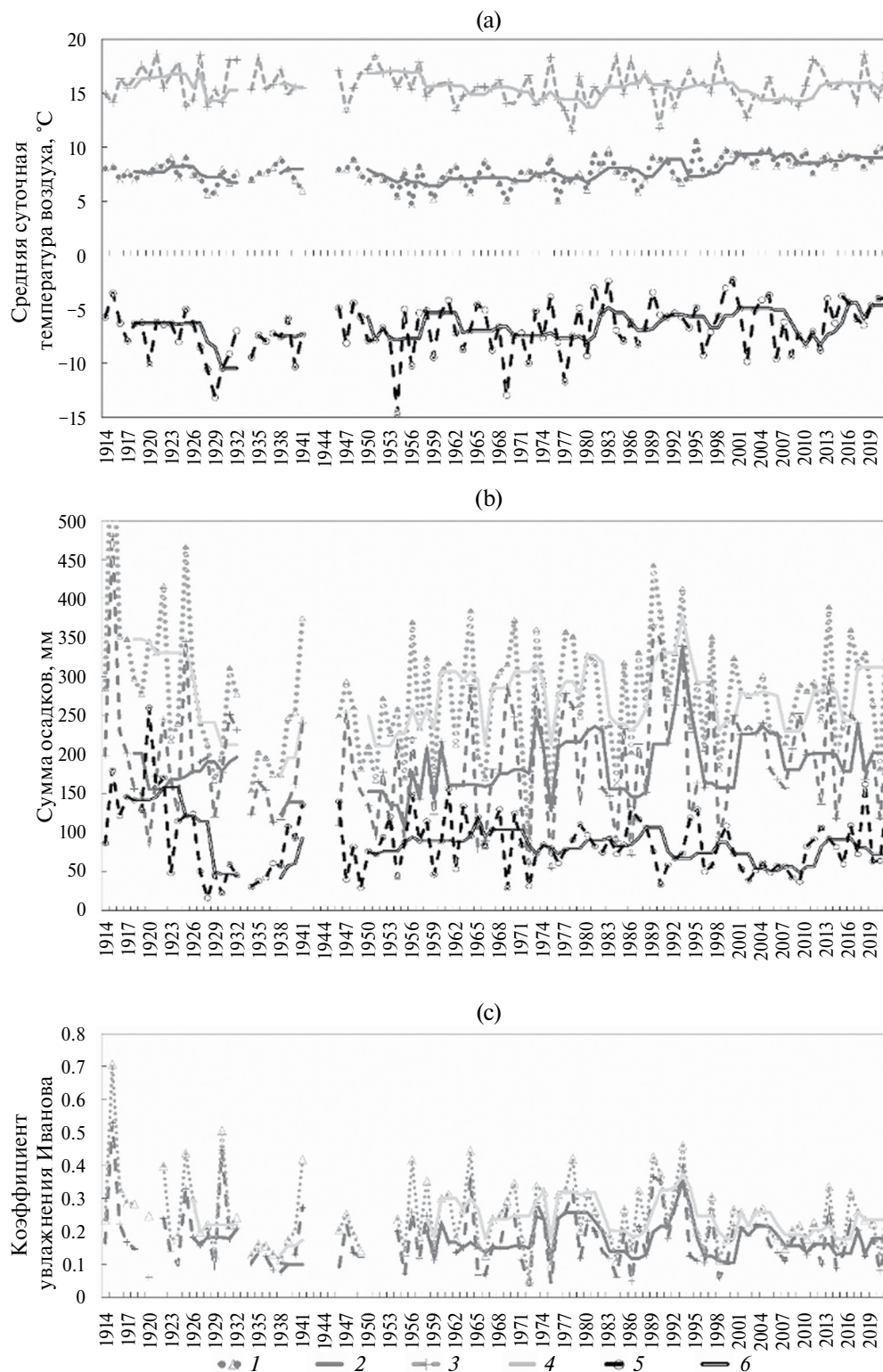
Однако отмечено, что среднегодовая температура воздуха за период 1975–2021 гг. на  $1.0^\circ\text{C}$  выше, чем за период 1914–1975 гг. В то же время среднегодовая влажность воздуха уменьшилась на 1% несмотря на то, что количество осадков увеличилось на 18 мм. Среднегодовая температура, по-видимому, увеличилась за счет увеличения средней температуры холодного периода года на  $1.5^\circ\text{C}$ . Влажность

холодного периода уменьшилась на 3.9%, а осадки на 11.9 мм (табл. 1).

Увеличение среднегодового количества осадков ( $\Delta = 18.3$  мм), очевидно, произошло за счет увеличения количества осадков теплого периода ( $\Delta = 39.5$  мм). Несмотря на то, что коэффициент Иванова не изменился ни для всего года, ни для теплого периода, полагаем, что изменения внутригодового распределения тепла и влаги повлияли на почвенные свойства.

В результате сопоставления **данных полевого описания** (табл. S12) и **лабораторных анализов** [38] почвы исследуемой микрокатены были названы следующим образом по Классификации и диагностике почв России [9] с учетом последних внесенных изменений [28, 29]. Разрезы 3-22 и 4-22 – каштановая солонцеватая глинисто-иллювирированная мицелярно-карбонатная сегрегационная квазиглееватая засоленная глубокогипссодержащая, формула профиля: {AJrz+AJel} (0–3 см) – AJ (3–18(21) см) – BMKsn (18(21)–30 см) – 2BCAnc,i,q,s (30–70 см) – 3Bca,s (70–72 см) – 4Bca,q,i,s (72–90 см) – 4BCAnc,mc,q,i,s (90–110 см) – 4BCsa,cs,q,i,s (110–180... см). Формула профиля разреза 4-22: {AJrz+AJel} (0(3(6) см) – AJ (3(6)–19 см) – 2BMKsn,(ca) (19–40 см) – 2Bca,sn,s (40–70 см) – 3Bca,s (70–72 см) – 4BCAnc,i,s (72–82(92) см) – 4BCAnc,mc,q,s (82(92)–110(120) см) – 4BCsa,cs,q,s,i (110(120)–180... см). Разрез 5-22 – каштановая солонцеватая сегрегационная мицелярно-карбонатная засоленная глубокогипссодержащая, формула профиля: {AJrz+AJel} (0–3 см) – AJ (3–16(20) см) – BMKsn,ca (16(20)–27(30) см) – BMKsn,mc,s (27(30)–34(40) см) – 2BCAnc,s (34(40)–62 см) – 2BCAnc,s (62–88 см) – 3BCsa,s (88–99(100) см) – 3BCsa,cs,s,i (99(100)–180... см). По классификации почв World Reference Base [34] почвы названы следующим образом: разрез 3-22 – Someric Calcic Luvisol Kastanozem (Loamic, Sodice); разрез 4-22 – Someric Calcic Luvisol Kastanozem (Loamic, Endosalic, Sodice); разрез 5-22 – Mollic Salic Calcic Solonchak (Loamic). Ввиду значительно различающихся подходов к макроморфологическому описанию, прямое сравнение полевых описаний микрокатены В.А. Девярых, заложенной им в 1968 г., и нашего повторения не представляется возможным. Однако можно выделить общие наборы горизонтов: гумусовые (поверхностные), срединные с признаками солонцового процесса (в описании 1968 г. это только призматическая структура, тогда как в 2022 г. были описаны глинисто-иллювиальные кутаны), срединные карбонатсодержащие, переходные к породе гипссодержащие (табл. S12, рис. 2).

Согласно рис. S1, **содержание и распределение органического углерода** (SOC – soil organic carbon) в почве разреза 4-22 в верхних 50 см почвенного профиля немного уменьшилось по сравнению с измеренным в 1968 г., однако эти изменения трудно



**Рис. 2.** Многолетний ход климатических показателей на Джаныбекской равнине с 1914 по 2021 гг. (обобщенные данные метеостанций Эльтон и Джаныбек): (а) — температура воздуха, °C; (б) — сумма осадков, мм; (с) — коэффициент увлажнения по Н.Н. Иванову. 1 — среднегодовые значения, 2 — среднегодовые значения, график сглажен пятилетними скользящими медианами; 3 — значения, усредненные за теплый период; 4 — значения, усредненные за теплый период, график сглажен пятилетними скользящими медианами; 5 — значения, усредненные за холодный период; 6 — значения, усредненные за холодный период, график сглажен пятилетними скользящими медианами. Примечание: для наглядности графика сумма осадков за 1915 г. не приводится (660 мм).

**Таблица 1.** Медианные значения климатических показателей Джаныбекской равнины с 1914 по 2021 гг. (обобщенные данные метеостанций Эльтон и Джаныбек) и их изменение ( $\Delta$  – разница между медианными значениями периодов 1976–2021 и 1914–1975 гг.)

Период	Температура воздуха, °C	Влажность воздуха, %	Осадки, мм	Коэффициент Иванова
Весь год				
1914–1975	7.5	66.8	260	0.23
1976–2021	8.54	65.8	278	0.23
$\Delta$	1.0	–1.0	18.3	0.0
Теплый период				
1914–1975	15.59	54.97	168.5	0.15
1976–2021	15.57	57.1	208	0.17
$\Delta$	–0.02	2.13	39.5	0.02
Холодный период				
1914–1975	–7.2	88.76	87.7	Не опр.
1976–2021	–5.69	84.85	75.8	»
$\Delta$	1.51	–3.91	–11.9	»

считать значимыми, т.к. в большинстве слоев, кроме слоя 0–10 см, они не превышают ошибку метода. Также отмечено, что тип распределения органического углерода одинаков для всех изученных в 2022 г. почв, а его содержание можно считать различным только в слое 0–5 см – причем в разрезе 3–22 больше, чем в разрезе 5–22. На всех остальных глубинах содержание органического углерода в изученных каштановых солонцеватых почвах в 2022 г. можно считать одинаковым. Следует упомянуть, что, по некоторым оценкам, повышение температуры на 1°C может привести к потере 10% SOC в регионах со среднегодовой температурой 5°C, в то время как регионы со среднегодовой температурой 30°C потеряют только 3% [35].

Как показано выше, среднегодовая температура воздуха в изучаемом регионе увеличилась именно на 1°C (с 7.5 до 8.5°C). И поскольку процесс потери органического углерода, по оценке авторов [32], имеет длительность в десятилетия, можно предполагать, что именно такой эффект уже наблюдается на территории Джаныбекского стационара. Однако потребуются дальнейшие мониторинговые наблюдения, чтобы достоверно подтвердить этот тренд.

**Результаты определения состава обменных катионов** представлены на рис. 3. Профили исследо-

ванных почв обнаруживают дифференциацию по составу обменных катионов – в верхней части профилей преобладающим катионом является  $\text{Ca}^{2+}$ , на долю которого приходится 60–70% емкости катионного обмена. Доля обменного магния в почвенном поглощающем комплексе (ППК) исследуемых почв составляет 17,4–48%.

Известно, что присутствие в профиле легко-растворимых солей, представленных преимущественно сульфатом и хлоридом натрия, а также двойным сульфатом натрия и магния – астраханитом [22] – приводит, в первую очередь, к повышению содержания в наиболее засоленных горизонтах иона  $\text{Na}^+$ , а затем  $\text{Mg}^{2+}$  в составе ППК [14]. В целом, для всех трех разрезов обнаруживается тесная обратная связь между содержанием обменных Ca и Na ( $R = -0.83$ ;  $-0.89$  и  $-0.91$  для разрезов 3–22, 4–22 и 5–22 соответственно), что объясняется уменьшением содержания в этом ряду почв органического вещества на фоне уменьшения мощности верхних горизонтов, промытых от легко-растворимых солей [1, 17, 30].

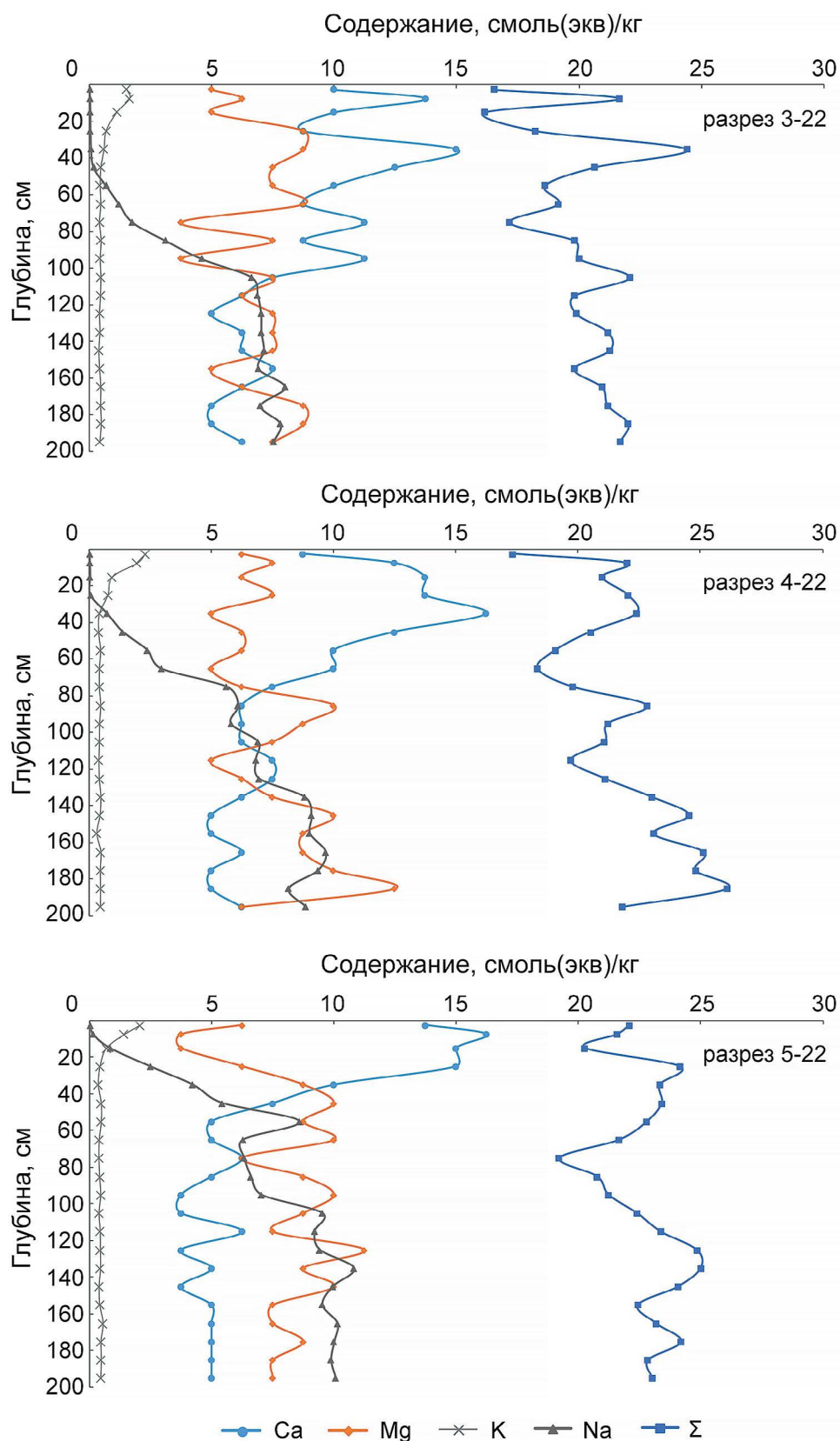
Профильное распределение  $\text{Mg}^{2+}$  также подвержено сильным колебаниям, особенно в разрезе 3–22, наиболее промытом от легко-растворимых солей и расположенном топографически ближе всего к лугово-каштановой почве в составе солонцового комплекса. Содержание и профильное распределение  $\text{Mg}^{2+}$  в этом разрезе наиболее близко к таковому для лугово-каштановых почв [10]. Содержание и распределение магния в разрезах 4–22 и 5–22, расположенных выше по катене, приближает их к таковому в профиле солончаковых солонцов [19].

Профильное распределение иона калия типично для всех почв солонцового комплекса Северного Прикаспия: максимум его содержания приходится на верхние горизонты со снижением вниз по профилю до 2%, что обусловлено присутствием в минералогическом составе исследуемых почв слюд и иллитов [11], обладающих очень высокой селективностью к данному катиону [24]. В связи с этим ион  $\text{K}^+$ , поступающий в почву с растительными остатками, удерживается почвой в обменном состоянии практически на месте, не мигрируя вниз по профилю.

Таким образом, по составу ППК и профильному распределению обменных катионов исследованные почвы занимают промежуточное положение между лугово-каштановыми почвами, где в составе ППК доминирует кальций, а профиль слабо дифференцирован по составу ППК, и солонцами, в которых подавляющая доля обменных позиций занята натрием.

Сравнивая данные, полученные в 1968 г. В.А. Девятых для верхних горизонтов почв этого же участка, с данными исследования для тех же глубин,





**Рис. 3.** Содержание обменных катионов в каштановых почвах микрокатены между I и II лентами гослесополосы Чапаевск–Владимировка (отбор образцов выполнен в 2022 г.). Σ – сумма обменных катионов.

можно отметить следующее: во всех трех профилях наблюдается существенное снижение доли обменного Na с одновременным ростом содержания обменного K.

Учитывая тот факт, что при отсутствии засоления в верхних горизонтах исследованных почв двухвалентные катионы поглощаются ППК с примерно одинаковой интенсивностью, отметим, что содержание обменного кальция и магния в разрезах 3-22 и 4-22 существенных изменений не претерпело, однако в горизонте 12–19 см разреза 5-22 оно возросло в 1.5 раза. Такие изменения в составе ППК можно отнести на счет повышения общей увлажненности территории за последние десятилетия XX в. [21, 23] и первые десятилетия XXI в., подтвержденного нашими исследованиями (табл. 1). Это вызвало постепенное освобождение верхних слоев почвы от легкорастворимых солей и одновременно с этим увеличение продуктивности травостоя вследствие увеличения увлажненности территории, что повлекло за собой усиление поступления в почву ионов калия с растительными остатками и соответствующее увеличение его содержания в ППК. Такие изменения почвенных свойств в результате потепления и повышение влажности климата описаны в литературе [41] и связаны они с увеличением концентрации CO<sub>2</sub> в почвенном воздухе [42], а также с вымыванием основных катионов.

**Микростроение исследуемых почв.** Горизонты {AJgz+AJel} (0–5 см) характеризуются плитчатой, комковатой и копрогенной микроструктурой, поры представлены трещинами, биогенными каналами и сложными порами упаковки, микросложение — порфировидное с компактной упаковкой частиц, тонкодисперсное вещество (ТДВ) глинисто-гумусовое, оптическая ориентация (ОО) вокругскелетная с различной степенью выраженности раздельно-чешуйчатой (табл. S13). Во внутрипедной массе (ВПМ) пропиточный гумус, сгустки и точечный гумус, очень много углефицированных растительных остатков (у.р.о.) и ожеженных растительных остатков (ож.р.о.), в порах большое количество растительных остатков (р.о.) от свежих до сильно разложившихся, встречаются ожеженные; характерно высокое обилие мелких экскрементов; встречаются Fe-Mn нодулы 100–800 мкм, преимущественно типичные, но также с включениями (табл. S14).

Верхние части горизонта AJ (8–12 см) характеризуются в основном губчатой биогенной микроструктурой с элементами угловато-блоковой, поры представлены биогенными каналами, сложными порами упаковки, трещинами. Микросложение порфировидное с компактной упаковкой частиц. ТДВ глинисто-гумусовое с вокругскелетной и мелкочешуйчатой ОО, кутан нет (табл. S13). В разрезе 3-22 нодул нет, в разрезе 4-22 и

разрезе 5-22 нодулы Fe-Mn обильно представлены (100–400 мкм, типичные и с включениями, единично Fe-глинистая конкреция). В разрезе 5-22 также единично встречен CaCO<sub>3</sub> микронодуль (100 мкм). В разрезе 3-22 инфиллингов нет; в разрезе 4-22 много крупнопылеватых инфиллингов по горизонтальному порам, единично встречен крупный CaCO<sub>3</sub> инфиллинг по ож.р.о.; в разрезе 5-22 встречено до 10 шт. на шлиф микритовых и спаритовых инфиллингов (до 500 мкм), а также несколько занесенных из нижележащего горизонта фрагментов с глинисто-карбонатным ТДВ. Степень пропитки гумусом ВПМ уменьшается вверх по микрокатене, но везде высокое обилие р.о., в разной степени разложившихся, а также у.р.о. и ож.р.о. разных размеров как в ВПМ, так и в порах (табл. S14).

Нижние части горизонта AJ (14–19 см) характеризуются копрогенной и губчатой микроструктурой с биогенными каналами и сложными порами упаковки; микросложение порфировидное с упаковкой частиц от компактной до некомпактной. ТДВ гумусово-глинистое, ОО раздельно-чешуйчатая, а в разрезах 4-22 и 5-22 с элементами струйчатой и перекрестно-волокнутой. Во всех трех профилях в нижней части горизонта AJ встречаются фрагментарные тонкие глинистые кутаны (табл. S13). Содержание дисперсного органического вещества в ВПМ уменьшается вверх по микрокатене, в разрезе 3-22 есть гумусовые сгустки, в разрезе 5-22 нет. Р.о. меньше всего в разрезе 5-22, в разрезах 3-22 и 4-22 примерно одинаково часто встречаются у.р.о. и ож.р.о. мелкие (до 200 мкм). Обилие экскрементов уменьшается вверх по микрокатене, но даже в разрезе 5-22 их довольно много, при этом в разрезе 5-22 отсутствуют экскременты клещей, в отличие от разрезов 3-22 и 4-22 (табл. S14).

Верхняя часть горизонтов BMKsn (20–31 см) характеризуется микроструктурой от угловато-блоковой в разрезе 3-22 до массивной в разрезе 5-22; поровое пространство представлено биогенными каналами и трещинами, а в разрезе 3-22 также сложными порами упаковки; микросложение порфировидное с упаковкой частиц от компактной до некомпактной. ТДВ в разрез 3-22 и 4-22 глинистое с раздельно-чешуйчатой ОО с элементами струйчатой и перекрестно-волокнутой. В разрезе 5-22 ТДВ микрозонально: гумусово-глинистое с вокругскелетной, струйчатой, перекрестно-волокнутой, раздельно-чешуйчатой оптической ориентацией в верхней части шлифа; карбонатно-глинистое с раздельно-чешуйчатой, вокругскелетной, кристаллитовой и струйчатой оптической ориентацией в нижней четверти шлифа. Во всех шлифах этой толщи отмечаются фрагментарные глинистые гипокутаны, их частота встречаемости увеличивается вверх по микрокатене. В разрезе 5-22 также отмечена тонкая микритовая кутана, залегающая



поверх глинистой кутаны (табл. S13). Гумус представлен точечной формой, в ВПМ обильны у.р.о. (до 350 мкм) и ож.р.о. (до 200 мкм), в порах средне- и сильноразложившиеся р.о., обилие которых уменьшается вверх по микрокатене. Во всех образцах этой толщи встречаются экскременты мезофауны, их обилие увеличивается вверх по микрокатене, а в разрезе 5-22 появляются копролиты (300–600 мкм) и фрагмент педотубулы (1×3.5 мм). В разрезе 3-22 нодулей и инфиллингов не встречено, в разрезах 4-22 и 5-22 железистые дендриты (100–200 мкм) с диффузными границами, в нижней четверти шлифа разреза 5-22 также отмечены карбонатное стяжение (800×300 мкм), мелкие нодули микритовые без включений различной формы (табл. S14).

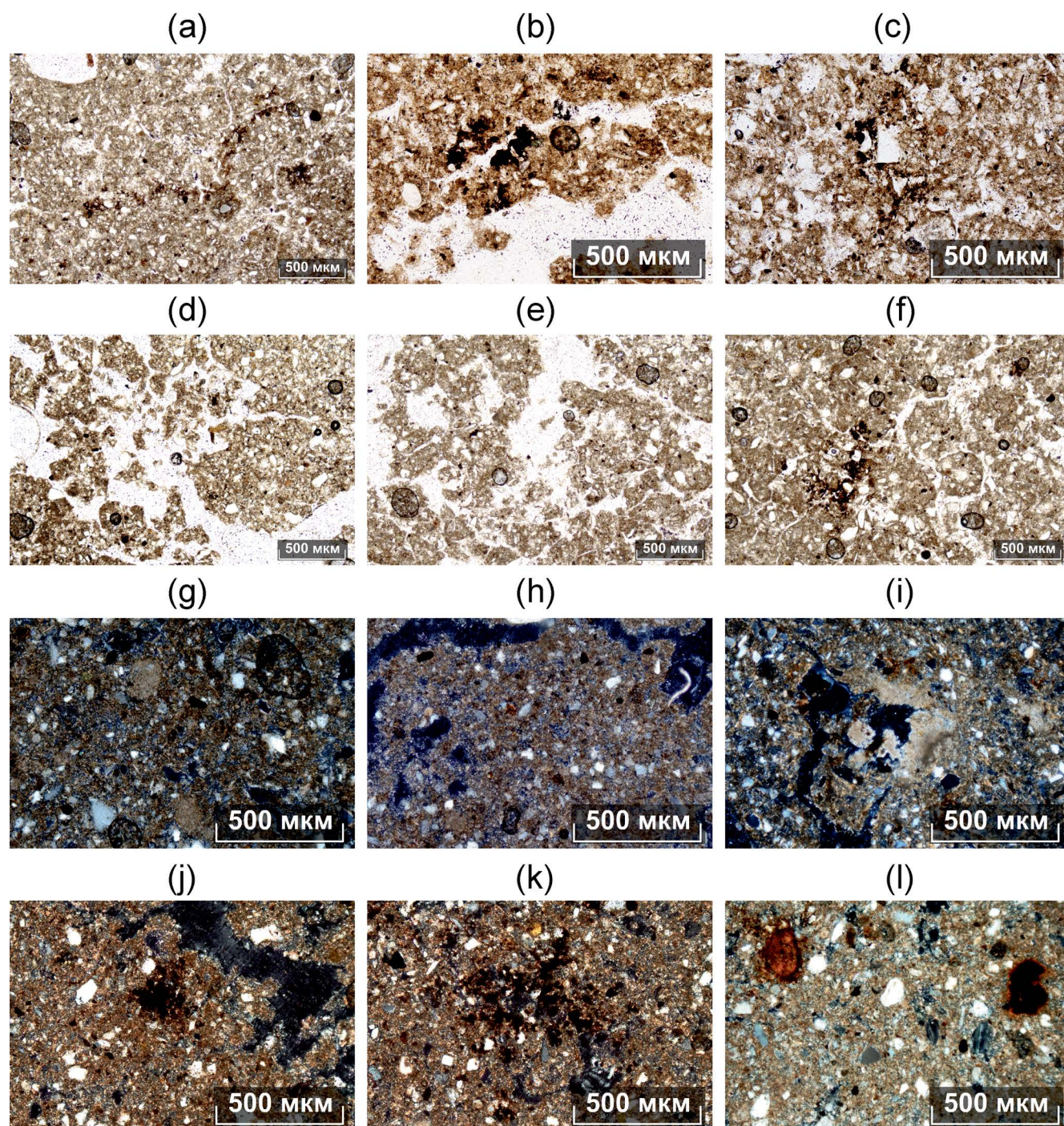
Шлифы нижележащей толщи (30–48 см), которая в связи с локальной почвенной неоднородностью относится в разрезе 3-22 к горизонтам ВСА, а в разрезах 4-22 и 5-22 — к горизонтам ВМКsn, — характеризуется следующими микропризнаками. Микроструктура от массивной, угловато- и округло-блоковой в нижней части микрокатены до копрогенной с элементами округло-блоковой в верхней части микрокатены, поры представлены трещинами и биогенными каналами, а в разрезе 5-22 также сложными порами упаковки. Микросложение порфировидное со слабокомпактной упаковкой частиц. ТДВ глинисто-карбонатное, ОО микрозонально раздельно-чешуйчатая и кристаллитовая, вокругскелетная, в разрезе 5-22 также с элементами перекрестно-волоконистой. В разрезе 3-22 единичные фрагментарные глинистые кутаны, в разрезе 4-22 две криптокристаллические кутаны, в разрезе 5-22 одна толстая глинистая кутана (табл. S13). Органическое вещество в ВПМ представлено точечной формой (а в разрезе 4-22 также аморфной), у.р.о. и ож.р.о. (до 100 мкм), сильноразложившимися р.о. (до 200 мкм). В порах часто встречаются сильноразложившиеся р.о., единично ож.р.о. и ок.р.о. (окарбоначенные растительные остатки). В большинстве исследованных шлифов этой толщи очень много мелких экскрементов. Инфиллингов нет, только в разрезе 5-22 (42–47 см) отмечены два гипсовых рыхлых неполных инфиллинга. Среди нодулей представлены единично железисто-органические типичные (в разрезах 3-22 и 4-22), обильно железисто-марганцевые с включениями, типичные и дендриты (в разрезе 5-22), обильно карбонатные со средним диаметром около 200 мкм во всех разрезах. Среди включений отмечаются зерна первичного кальцита, обломки раковин моллюсков, фрагменты глинистой почвообразующей породы предположительно хвалынского возраста (табл. S14).

Нижний горизонт ВСca,cs,s,i (110–117 см) имеет массивную микроструктуру с элементами копрогенной, поры представлены преимущественно

биогенными каналами и трещинами, микросложение порфировидное со слабокомпактной упаковкой частиц. Состав ТДВ глинисто-карбонатный, ОО кристаллитовая, в разрезе 3-22 также имеются элементы раздельно-чешуйчатой и струйчатой и единичная глинистая кутана (табл. S13). Органическое вещество в ВПМ представлено немногочисленными сильноразложившимися р.о. в разрезах 3-22 и 4-22, в разрезе 5-22 — очень мелкими у.р.о., т.е. количество растительных остатков в этой толще уменьшается вверх по микрокатене. В порах р.о. не отмечено. Экскременты присутствуют во всех образцах этой толщи, их количество и разнообразие также уменьшается вверх по микрокатене. Во всех изученных разрезах на глубине 110–117 см встречаются гипсовые крупнокристаллические инфиллинги, Fe-Mn дендриты (до 300 мкм), Fe и Fe-Mn нодули (100–250 мкм). В разрезе 3-22 единично отмечена железистая конкреция, в разрезе 5-22 несколько Fe-Mn конкреций. В составе включений во всех разрезах обилие первичного кальцита, который представлен частицами преимущественно округлой, реже неправильной формы (50–100 мкм) и фрагменты глинистой почвообразующей породы предположительно хвалынского возраста. Также встречаются округлые микроагрегаты с кольцевой ориентацией глинистого ТДВ, похожие на ооиды (табл. S14).

Переходя к анализу полученных данных о микростроении исследуемых почв, нужно упомянуть, что в 2022 году у нас была возможность отобрать образцы более дробно, чем это было сделано В.А. Девятым в 1968 г, поэтому глубины сравниваемых шлифов не везде совпадают. Иногда на один шлиф В.А. Девятого приходится два шлифа из образцов 2022 г. Для наглядности схема отбора микромонолитов для изготовления шлифов приводится на рис. S2. В 2022 г в микростроении исследуемых почв отмечаются следующие общие закономерности: 1) большая глубина проникновения корней растений, что выражается в обилии растительных остатков разной степени разложенности, которые встречаются даже на глубине 112–117 см в разрезах 3-22 и 4-22 (рис. 4а–4с); 2) большая глубина зоогенной переработки почвенного материала, выражающаяся в обилии экскрементов личинок жуков, многоножек, мокриц, клещей [3, 6] даже на глубине 112–117 см во всех разрезах микрокатены (рис. 4d–4f); 3) малая глубина обнаружения карбонатных новообразований (от 32–37 см в разрезе 3-22 до 20–25 см в разрезе 5-22 — рис. 4g–4i); 4) обилие железистых и железисто-марганцевых новообразований, в том числе нодулей с включениями и дендритов (рис. 4j–4l). Глубина проникновения корней растений и появления карбонатных новообразований, обилие экскрементов почвенной микрофауны уменьшается от нижней точки микрокатены к верхней. Вместе с





**Рис. 4.** Особенности микростроения каштановых почв микрокатены между I и II лентами гослесополосы Чап-евск–Владимировка (отбор образцов выполнен в 2022 г.): (a), (b), (c) – аморфные растительные остатки, утратившие клеточное строение; (d), (e), (f) – экскременты микрофауны; (g), (h), (i) – карбонатные новообразования; (j), (k), (l) – Fe-Mn и Fe нодулы различных типов. Примечания: слева направо в каждом ряду размещены снимки шлифов разрезов 3–22, 4–22, 5–22 соответственно; (a)–(f) – съемка в проходящем плоскополяризованном свете без анализатора, (g)–(l) – с анализатором; (a)–(f), (j)–(l) – глубина 110–117 см, (g) – 32–37 см, (h) – 37–42 см, (i) – 20–25 см.



тем степень развития солонцового процесса, хотя в общем для всех почв и низкая, все же увеличивается в этом же направлении. Это выражается в увеличении частоты встречаемости фрагментарных глинистых гипокутан в горизонте ВМК<sub>sp</sub> разреза 5-22 по сравнению с остальными разрезами микрокатены и появлению в нем перекрестно-волокнистой оптической ориентации глинистого тонкодисперсного вещества.

По сравнению с микростроением данных почв в 1968 г. можно выделить следующие отличия. Во-первых, увеличение глубины проникновения корней и мезофауны, диагностируемые по наличию в порах сильноразложившихся растительных остатков и по обилию экскрементов, формирующих микрозонально участки копрогенной микроструктуры. Причем отметим, что в шлифах 1968 г. пробоотбора комковатая микроструктура нижних горизонтов была нарушена воздействием кристаллизации гипса. Хотя в разрезе 3 1968 г. пробоотбора отмечено обилие биогенных каналов, в этих порах не встречались растительные остатки, а во внутривершинной массе встречались только очень мелкие (до 50 мкм) углефицированные, тогда как в 2022 г. в этом же слое во внутривершинной массе отмечались сильноразложившиеся аморфные растительные остатки размерами до 300 мкм. Исходя из этих фактов и анализа климатических данных можно предположить, что к 2022 г. увеличилось количество осадков, несмотря на сохранение характерных для Прикаспийской низменности циклов более и менее засушливых лет [18].

Во-вторых, уменьшение глубины не только карбонатной пропитки глинистого тонкодисперсного вещества, но и формирования карбонатных концентрационных новообразований, вызванное как деятельностью корней, так и колебаниями влажности почвы. В-третьих, отмечена тенденция к ослаблению выраженности солонцового процесса, проявляющаяся в преобладании раздельно-чешуйчатой оптической ориентации глинистого тонкодисперсного вещества над струйчатой и перекрестно-волокнистой в горизонтах с индексом *sp*. Эта тенденция объясняется освобождением верхних горизонтов почвы от легкорастворимых солей и, как следствие, уменьшением содержания обменного натрия в ППК. В-четвертых, по сравнению со шлифами 1968 г., в шлифах 2022 г. отмечается высокое обилие железистых и железисто-марганцевых новообразований, являющихся признаком кратковременных периодов относительного избыточного увлажнения соответствующих горизонтов в присутствии растительных остатков [47].

Согласно рис. 5 *солевых профилей*, во всех разрезах микрокатены, заложенной в 2022 г., присутствует сульфатно-натриевое засоление: в разрезе 3-22 с глубины 60 см степень засоления средняя, сульфатно-содовое натриевое, со 100 см сильная

степень сульфатного магниево-натриевого засоления; в разрезе 4-22 слабая степень засоления проявляется уже с глубины 30 см, содово-сульфатно-магниево-натриевого химизма, а с 70 см уже сильное засоление, химизм его в толще 70–110 см преобладает хлоридно-сульфатно-магниево-натриевый, со 110 см сульфатно-магниево-натриевый, в слое 190–200 появляется гипс. В разрезе 5-22 в слое 20–30 см слабое сульфатно-содово-натриевое засоление, которое быстро переходит в сильное хлоридно-сульфатно-натриевое на глубине 40 см, а с глубины 70 см становится очень сильным хлоридно-сульфатно-магниево-натриевым.

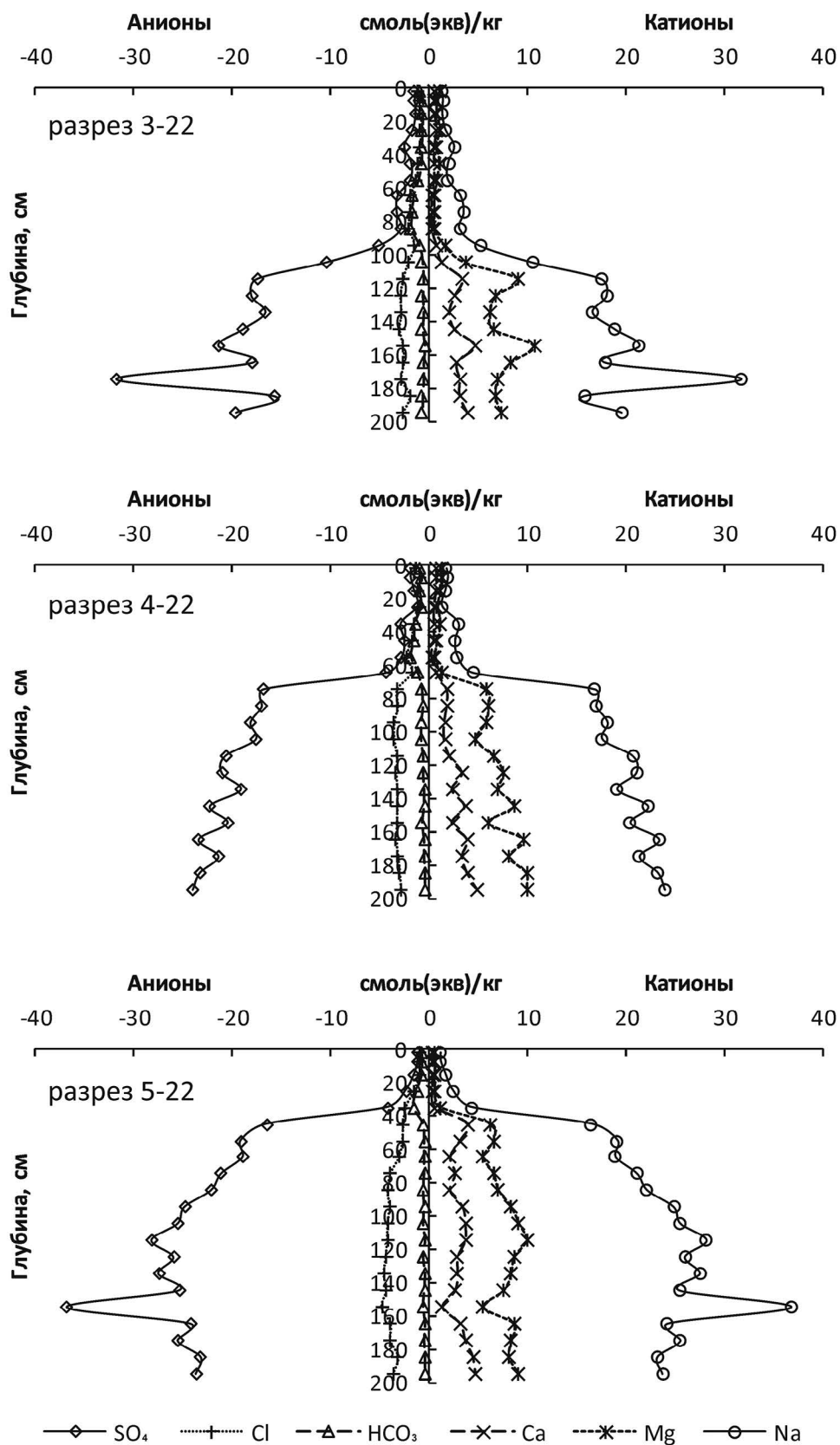
Эта картина засоления резко контрастирует с описанной нами по данным В.А. Девярых, полученным в 1968 г. [16]. В разрезе 3 засоление было слабым и проявлялось с глубины 150–160 см, т.е. за 54 года глубина проявления засоления уменьшилась на целый метр, а его интенсивность из слабой стала сильной. В разрезе 4 слабое засоление проявлялось с глубины 60 см, а сильное – со 140 см, то есть глубина проявления слабого засоления уменьшилась на 30 см, а сильного – на 70 см.

В разрезе 5 в 1968 г. слабое засоление проявлялось на глубине 40 см, сильное – на 100 см, очень сильное – со 110 см, то есть глубина проявления слабого засоления уменьшилась на 20 см, сильного и очень сильного – на 60 и 40 см соответственно.

Согласно данным В.А. Девярых, УГВ под разрезом 5 осенью 1967 г. составлял 6.65 м, весной 1968 г. – 6.16 м, осенью 1968 г. – 6.22 м. Проведены мониторинговые наблюдения за УГВ, который составил весной 2022 г. 5.25 м, осенью 2022 г. – 5.54 м. Минерализация грунтовых вод увеличилась в два раза, содержание ионов хлора увеличилось минимум в 2.5 раза, магния – минимум в 2 раза, натрия – в 4.5–7 раз (табл. S15). Таким образом, можно заключить, что за прошедшие 54 года уровень грунтовых вод поднялся ~ на 1 м и увеличилась степень их засоленности. С учетом приведенных данных можно сделать вывод, что именно поднятие и увеличение засоленности грунтовых вод оказало такое сильное влияние на солевой режим почв изученной микрокатены. Причины поднятия УГВ могут быть как в изменении климата, а именно увеличении количества осадков, приводящем последовательно к изменению глубины залегания грунтовых вод и увеличению засоленности засушливых земель [40], так и в подъеме уровня Каспийского моря [25].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено мониторинговое исследование изменений климата и свойств каштановых солонцеватых почв сухостепной зоны за последние 54 года на примере Джаныбекского стационара Института лесоведения РАН. Период изучения включает в себя достоверно установленный мировым научным



**Рис. 5.** Солевые профили каштановых почв микрокатены между I и II лентами гослесополосы Чапаевск–Владимировка (отбор образцов выполнен в 2022 г.).

сообществом срок глобального изменения климата, обусловленного антропогенным воздействием. Выявлены локальные особенности изменения климата. Установлено, что на изучаемой территории в период 1976–2021 гг. по сравнению с периодом 1914–1975 гг. произошло увеличение среднегодовой температуры воздуха на 1°C и суммы осадков на 18.3 мм, увеличение среднемноголетней температуры холодного периода года на 1.5°C и уменьшение суммы осадков холодного периода на 11.9 мм, увеличение среднемноголетней суммы осадков теплого периода на 39.5 мм.

Изменение климатических показателей происходит на изучаемой территории одновременно с поднятием УГВ на 1 м, что обуславливает неблагоприятный процесс усиления засоленности изученных почв и уменьшение глубины ее проявления. Вместе с уменьшением глубины засоления уменьшилась глубина обнаружения карбоната кальция, что способствовало уменьшению морфологических проявлений солонцового процесса.

В то же время благодаря увеличению суммы осадков повысилась активность почвенной мезофауны (многоножек, мокриц, клещей), что отразилось в увеличении глубины биогенной проработки почвенной толщи. Увеличилась глубина проникновения корней растений и обилие растительных остатков на микроуровне, что пока не нашло отражения в данных химического анализа — достоверного увеличения содержания органического углерода в почве не наблюдается.

При сохранении выявленных трендов климата в перспективе десятилетий можно предположить, что развитие мезофитной растительности может привести к подтягиванию засоленного почвенного раствора к поверхности за счет десукции с возникновением в биогенных порах карбонатных и гипсовых новообразований. Однако такие новообразования являются лабильными и не должны оказать сильного негативного влияния на растительность.

В течение нескольких десятилетий можно ожидать увеличения продуктивности травянистых экосистем, содержания и запасов органического углерода, что является значимым для малогумусных сухостепных почв и может существенно повлиять на состав почвенного микробиома. Для подтверждения и выявления особенностей таких изменений необходимо расширение стационарных наблюдений с привлечением специалистов в области ботаники, биологии и гидрологии почв.

#### БЛАГОДАРНОСТЬ

Коллектив авторов статьи выражает благодарность Н.Б. Хитрову за помощь в индексации почвенных горизонтов.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование проведено за счет средств гранта РНФ № 21-74-20121.

#### СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

В данной работе отсутствуют исследования человека или животных.

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

#### ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Онлайн-версия содержит дополнительные материалы, доступные по адресу <https://doi.org/10.31857/S0032180X24120132>

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ванюшина А.Я., Травникова Л.С., Шаймухаметов М.Ш. Термодинамическая характеристика обмена Са–Na в слитых и сопряженных с ними зональных почвах // Почвоведение. 1998. № 2. С. 176–185.
2. Воробьева Л.А. Химический анализ почв. М.: Изд-во МГУ, 1998. 272 с.
3. Всеволодова-Перель Т.С., Колесников А.В. Количественная характеристика мезофауны почв солонцового комплекса полупустыни Северного Прикаспия // Почвоведение. 2010. № 11. С. 1381–1386.
4. Гедройц К.К. Избр. соч. Т. 2. Химический анализ почвы. М.: Сельхозгиз, 1955. 616 с.
5. Герасимова М.И., Ковда И.В., Лебедева М.П., Туркина Т.В. Микроморфологические термины как отражение современного состояния исследований микростроения почв // Почвоведение. 2011. № 7. С. 804–817.
6. Гиляров М.С. Зоологический метод диагностики почв. М.: Наука, 1965. 275 с.
7. Иванов Н.Н. Об определении величин испаряемости // Изв. Всесоюзного географического общества. 1954. Т. 86. № 2. С. 189–196.
8. Качинский Н.А. Механический и микроагрегатный состав почвы, методы его изучения. М.: Изд-во Акад. наук СССР, 1958. 192 с.
9. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
10. Колесников А.В. Закономерности катионного обмена в целинных и мелиорированных лугово-каштановых почв Северного Прикаспия (на примере почв Джаныбекского стационара). Дис. ... канд. биол. наук. М., 2004. 266 с.

11. Колесников А.В., Соколова Т.А., Сиземская М.Л. Характеристика поглощающего комплекса лугово-каштановых почв Северного Прикаспия (Джаныбекский стационар) // Почвоведение. 2006. № 2. С. 179–189.
12. Лебедева М.П., Конюшкова М.В. Временные изменения микропризнаков в целинных и мелиорированных солонцах Джаныбекского стационара // Почвоведение. 2011. № 7. С. 818–831.
13. Лебедева М.П., Конюшкова М.В., Колесников А.В., Хохлов С.Ф. Мониторинг изменений свойств целинного солонца Джаныбекского стационара по данным микроморфологических исследований // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2016. № 83. С. 118–139.
14. Минкин М.Б., Бабушкин В.М., Садименко П.А. Солонцы юго-востока Ростовской области. Ростов-на-Дону: Изд-во Ростовского ун-та, 1980. 272 с.
15. Молодцов В.А., Игнатова В.П. Об определении состава поглощенных оснований в засоленных почвах // Почвоведение. 1975. № 6. С. 123–127.
16. Плотникова О.О., Лебедева М.П., Цымбарович П.Р., Девярых В.А. Микроморфологическая характеристика почв солонцового комплекса (Джаныбекская равнина) // Почвоведение. 2023. № 3. С. 380–392.  
<https://doi.org/10.31857/S0032180X22601128>.
17. Понизовский А.А., Иванова С.А. Влияние рН раствора на равновесие обмена Са-Na в почвах // Почвоведение. 1990. № 8. С. 53–60.
18. Роде А.А., Польский М.Н. Почвы Джаныбекского стационара, их морфологическое строение, механический и химический состав и физические свойства // Тр. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 1961. Т. 56. С. 3–214.
19. Романенков В.А. Изменение почвенно-поглощающего комплекса солончаковых солонцов при мелиорации // Повышение продуктивности полупустынных земель Северного Прикаспия. М.: Наука, 1989. С. 48–59.
20. Руководство по описанию почв. Рим: Продовольств. и с.-х. орг. Объед. Наций, 2012. 101 с.
21. Сапанов М.К. Особенности и экологические последствия потепления климата в полупустыне Северного Прикаспия // Поволжский экологический журнал. 2021. № 1. С. 64–78.  
<https://doi.org/10.35885/1684-7318-2021-1-64-78>
22. Сиземская М.Л. Изменение морфологии и солевого состояния почв солонцового комплекса Северного Прикаспия под влиянием агролесомелиорации. Автореф. дис. ... канд. биол. наук. М., 1990. 24 с.
23. Сиземская М.Л., Сапанов М.К. Современное состояние экосистем и стратегия адаптивного природопользования в полупустыне Северного Прикаспия // Аридные экосистемы. 2010. Т. 16. № 5. С. 15–24.
24. Соколова Т.А., Дронова Т.А., Толпешта И.И. Глинистые минералы в почвах. Тула: Гриф и К, 2005. 336 с.
25. Соколова Т.А., Сиземская М.Л., Сапанов М.К., Толпешта И.И. Изменение содержания и состава солей в почвах солонцового комплекса Джаныбекского стационара за последние 40–50 лет // Почвоведение. 2000. № 11. С. 1328–1339.
26. Таргульян В.О., Горячкин С.В. Память почв: Почва как память биосферно-геосферно-антропоферных взаимодействий. М.: Изд-во ЛКИ, 2008. 672 с.
27. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / Под ред. Катцова В.М. СПб.: Научные технологии, 2022. 676 с.
28. Хитров Н.Б., Герасимова М.И. Диагностические горизонты в классификации почв России: версия 2021 г. // Почвоведение. 2021. № 8. С. 899–910.  
<https://doi.org/10.31857/S0032180X21080098>
29. Хитров Н.Б., Герасимова М.И. Предлагаемые изменения в классификации почв России: диагностические признаки и почвообразующие породы // Почвоведение. 2022. № 1. С. 3–14.  
<https://doi.org/10.31857/S0032180X22010087>
30. Шаймухаметов М.Ш., Куракулов С.Н. Реакция обмена Са-Na в черноземах и прогнозирование влияния оросительных вод на некоторые их свойства // Почвоведение. 1990. № 3. С. 88–104.
31. Corwin D.L. Climate change impacts on soil salinity in agricultural areas // Eur. J. Soil Sci. 2021. V. 72. № 2. P. 842–862.
32. Filippi P., Minasny B., Cattle S.R. and Bishop T.F.A. Chapter four – monitoring and modeling soil change: the influence of human activity and climatic shifts on aspects of soil spatiotemporally // Advances in Agronomy. 2016. V. 139. P. 153–214  
<https://doi.org/10.1016/bs.agron.2016.06.001>
33. Hatfield J.L., Antle J., Garrett K.A., Izaurralde R.C., Mader T., Marshall E., Nearing M., Philip Robertson G. and Ziska L. Indicators of climate change in agricultural systems // Climatic Change. 2020. V. 163. P. 1719–1732.
34. IUSS Working Group WRB 2015. World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015 International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps (World Soil Resources Reports no 106) (Rome: FAO)
35. Kirschbaum M.U.F. The temperature dependence of soil organic matter decomposition, and the effect of global warming on soil organic C storage // Soil Biol. Biochem. 1995. V. 27. P. 753–760.
36. Lebedeva (Verba) M., Gerasimova M. and Konyushkova M. Micromorphology of solonchaks horizons as related to environmental events in the Caspian Lowland // J. Mt. Sci. 2009. V. 6. P. 132–138.  
<https://doi.org/10.1007/s11629-009-1029-z>



37. *Munsell A.* Munsell soil color charts. (Macbeth Division of Kollmorgen Instruments Corporation, New Windsor, NY, Munsell Color, 1994).
38. *Plotnikova O.O., Lebedeva M. P., Kolesnikov A. V., Kaganova A. E., Komkova D. S.* A dataset of microstructure features and physicochemical properties of soils of the solonchik complex in 2022 (Caspian lowland) // *Data in Brief*. 2023. V. 50. P. 109493. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2023.109493>
39. *Plotnikova O.O., Lebedeva M.P., Tsybarovich P.R., Devyatikh V.A.* A dataset of soil microstructure features and physicochemical properties for 1968 and climate sequence for 1951–1992 in the Caspian lowland // *Data in Brief*. 2023. V. 46. P. 108909. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2023.108909>
40. *Raison J., Khanna P.K.* Possible impacts of climate change on forest soil health // *Soil Health and Climate Change*. 2011. P. 257–285.
41. *Rengel Z.* Soil pH, Soil Health and Climate Change // *Soil Health and Climate Change*. 2011. P. 69–85. doi:10.1007/978-3-642-20256-8\_4
42. *Reth S, Reichstein M, Falge E.* The effect of soil water content, soil temperature, soil pH-value and the root mass on soil CO<sub>2</sub> efflux – a modified model // *Plant Soil*. 2005. V. 268. P. 21–33.
43. *Romanis T., Lebedeva M., Kolesnikov A., Sapanov M., Sizemskaya M.* A dataset of soil microstructure features and the weather conditions affecting them from 2005 to 2021 in the Caspian Depression // *Data in Brief*. 2022. V. 41. P. 107957. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2022.107957>
44. *Schils R., Kuikman P., Liski J., Van Oijen M., Smith P., Webb J., Alm J., Somogyi Z., Van den Akker J., Billel M. and Emmett B.* Review of existing information on the interrelations between soil and climate change. *ClimSoil*. 2008. Final report.
45. *Smith P., Soussana J.F., Angers D., Schipper L., Chenu C., Rasse D.P., Batjes N.H., Van Egmond F., McNeill S., Kuhnert M. and Arias-Navarro C.* How to measure, report and verify soil carbon change to realize the potential of soil carbon sequestration for atmospheric greenhouse gas removal // *Global Change Biology*. 2020. V. 26. P. 219–241.
46. *Stoops G.* Guidelines for analysis and description of soil and regolith thin sections. John Wiley & Sons (Publ.), 2021. 240 p.
47. *Vepraskas M.J., Lindbo D.L., Stolt M.H.* Redoximorphic Features // *Int. Micromorphol. Features Soils Regoliths*. 2018. P. 425–445. <https://doi.org/10.1016/b978-0-444-63522-8.00015-2>

## How Have the Chestnut Soils of the Dzhanybek Plain Been Transformed as a Result of Climate Change?

**O. O. Plotnikova<sup>1</sup>, M. P. Lebedeva<sup>1</sup>, A. V. Kolesnikov<sup>1, 2</sup>,  
A. E. Kaganova<sup>1</sup>, P. R. Tsybarovich<sup>1</sup>, and D. S. Komkova<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Dokuchaev Soil Science Institute, Moscow, 119017 Russia*

<sup>2</sup>*Institute of Forest Science of the Russian Academy of Sciences, Uspenskoe, 143030 Russia*

\*e-mail: [mrs.plotnikova@mail.ru](mailto:mrs.plotnikova@mail.ru)

The period from the mid–1970s is distinguished as the period of modern global warming, and 1976 is conventionally taken as its beginning. The territories of southern and arid regions are especially sensitive to climatic changes, so the aim of the work was to identify the peculiarities of climate warming in the territory of the Dzhanybek plain and changes in soil properties associated with the established climatic trends. The object of the study is a microcatena of chestnut solonchik soils (Somerich Calcic Luvisol Kastanozem (Loamic, Sodic) and Mollic Calcic Solonchik (Loamic)) on the territory of Dzhanybek station of the Institute of Forestry Science of the Russian Academy of Sciences. Data on the climate of the study area for the period 1914–2021 are summarized. It is revealed that in the period 1976–2021 compared to the period 1914–1975 increased: the average annual  $T$  (temperature) of the air by 1° C and  $\Sigma p$  (sum of precipitation) by 18.3 mm; the average annual  $T$  of the cold period by 1.5° C; the average annual  $\Sigma p$  of the warm period by 39.5 mm. Using field, micromorphological, chemical methods it was established that for the last 54 years the groundwater table has risen by 1 m, groundwater mineralization and salinity has increased at least 2 times, salinization and carbonatization of the studied soils have increased, the depth of processing by soil mesofauna and the depth of root penetration have increased, which has not yet been reflected in the content of organic carbon. If the identified climate trends continue, the studied soils are expected to become saline and carbonate from the surface and increase in carbon content and stock, but continued and expanded stationary observations are required to confirm such changes.

**Keywords:** soil micromorphology, saline soils, dry-steppe zone, arid soils, global warming