

МИНЕРАЛОГИЯ  
И МИКРОМОРФОЛОГИЯ ПОЧВ

УДК 631.44.061

МИКРОМОРФОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПОЧВ  
СОЛОНЦОВОГО КОМПЛЕКСА (ДЖАНЫБЕКСКАЯ РАВНИНА)

© 2023 г. О. О. Плотникова<sup>а</sup>, \*, М. П. Лебедева<sup>а</sup>, П. Р. Цымбарович<sup>а</sup>, В. А. Девярых<sup>а</sup>

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

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

Поступила в редакцию 15.09.2022 г.

После доработки 08.11.2022 г.

Принята к публикации 09.11.2022 г.

Проведен сравнительный анализ физико-химических и микроморфологических свойств в образцах 1968 г. отбора из целинных почв сухостепного солонцового комплекса как исходной точки в хронологии с 1968 по 2022 гг. Исследование климатических параметров за период 1914–1968 гг. показало, что за 54 года, предшествующие отбору образцов, почвы развивались в относительно стабильных климатических условиях. Анализ свойств почв позволил выявить, что на практически ровном участке при перепаде высот всего в 3.6 см на расстоянии 229 см почвы существенно различаются по глубине и степени засоления, степени солонцеватости, микроформам и содержанию органического вещества, наличию и количеству глинистых кутан, свидетельствующих о степени подвижности тонкодисперсного вещества. Результаты настоящего исследования подтверждают описанные в многочисленных исследованиях закономерности перераспределения влаги на этой территории даже при очень малых перепадах высот. На основании комплекса имеющихся показателей почвы микрокатены относятся к разным таксономическим единицам. Почву нижней части микросклона по Классификации почв СССР (1977) можно отнести к светло-каштановым, по международной классификации WRB (2015) – к *haplic Kastanozem (Loamic)*. Почвы в средней и верхней частях микрокатены с высоким содержанием обменного натрия и наличием глинистых кутан по Классификации почв СССР (1977) относятся к солонцам, по WRB (2015) – к почвенной реферативной группе *Solonetz*.

**Ключевые слова:** климат, Прикаспийская низменность, остепняющийся солонец, эволюция почв, генезис почв

**DOI:** 10.31857/S0032180X22601128, **EDN:** HBRZMM

## ВВЕДЕНИЕ

Изменение климата, ускорившееся в XX в., признается мировым научным сообществом объективно существующим и занимает одно из первых мест среди экологических проблем современности [5]. Общее изменение климата сказывается на сельскохозяйственных условиях и экономической активности во всех климатических зонах России, особенно в средней полосе и южных районах. При этом изменения климата неминуемо ведут к изменению структуры и физических свойств почв. Так, территории южных и засушливых районов чувствительны к климатическим изменениям, поэтому приковывают пристальное внимание Продовольственной и сельскохозяйственной организации Объединенных Наций (ФАО), Европейской комиссии и Международной земельной коалиции [7]. Прогнозирование и эффективное управление почвенными ресурсами России в условиях активного изменения климатических условий невозможно без де-

тального понимания отклика почвы на изменения за последние 50–100 лет.

В Почвенном институте им. В.В. Докучаева накоплен уникальный материал – почвенные шлифы (плоские тонкие (толщиной 30 мкм) параллельные срезы почвы, закрепленные смолой) из нескольких климатических зон, где почвенные наблюдения и отбор образцов проходили в одних и тех же местах в течение последних 70 лет. Использование этих материалов в сопряжении с метеоданными за последнее столетие позволит выявить связь изменений климата и почвенных свойств. Полученные сведения могут быть использованы для прогнозирования состояния почв территорий, уязвимых к глобальному потеплению.

Цель работы – охарактеризовать почвы солонцового комплекса и климат исходной точки хронологии 1968–2022 гг. ключевого участка “Джаныбек” (участок I–II ленты гослесополосы). В связи с выбранной целью решали задачи: 1) сбор и анализ климатических данных для характеризуемой территории за период наблюдений, предшеству-

ющий году отбора образцов; 2) анализ данных о физико-химических свойствах почв солонцового комплекса; 3) изучение микростроения почв солонцового комплекса.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Территория исследования расположена в северо-западной части Прикаспийской низменности. Почвообразующие породы – желто-бурые карбонатные суглинки с прослоями песка, богатые гипсом [3]. Объектом исследования является микрокатена каштановых почв, в разной степени солонцеватых, расположенная в солонцовом комплексе между I и II лентами гослесополосы Чапаевск–Владимировка вблизи Джаныбекского стационара Института лесоведения РАН. Растительность пустынно-степная: в год исследования преобладали пижма тысячелистниколистная (*Tanacetum achilleifolium* (M. Bieb.) Sch. Bip.), овсяница бороздчатая (*Festuca valesiaca* subsp. *sulcata* (Hack.) Schinz et R. Keller), житняк пустынный (*Agropyron desertorum* (Fisch. ex Link) J.A. Schultes), – высота травостоя 12–16 см, проективное покрытие 65–70%. Разрезы были заложены В.А. Девятых в 1968 г. и располагались на микро-склоне, длина микрокатены составила 3 м, превышение между верхней и нижней точкой – 3.6 см, расстояние между точками 3 и 5 на профиле – 229 см (рис. S1). Верхняя точка микрокатены – наиболее солонцеватая почва – разрез 5. Нижняя точка микрокатены – наименее солонцеватая почва – разрез 3. Почва, занимающая промежуточное положение по солонцеватости и микро-рельефу – разрез 4. Данная микрокатена занимала среднюю часть траншеи длиной 9.5 м с общим перепадом рельефа между крайними точками 24.4 см. Для этой микрокатены, находящейся в переходной зоне от солонца к лугово-каштановой почве, в трех разрезах (3, 4, 5) были сделаны почвенные шлифы, способные дать ценную информацию о микростроении почв.

Полевое описание трех почвенных разрезов выполнено В.А. Девятых в 1968 г. (индексы горизонтов приводятся в соответствии с представлениями о классификации почв, существовавшими на момент описания микрокатены). На момент описания макроморфологические свойства почв между собой принципиально не отличались, что позволило В.А. Девятых в 1968 г. дать общее для них описание в своей работе [6]. Гумусовые горизонты А (0–20/20 см), обильно пронизанные корнями, характеризовались серым цветом, пылевато-суглинистым гранулометрическим составом, слоевато-чешуйчатой структурой, легко раздавливается в порошок. Переходные по гумусу горизонты В1 (20–30/10 см) также содержали довольно много корней, имели коричнево-бурый цвет с серым оттенком, пылевато-суглинистый

гранулометрический состав, хорошо выраженную призматическую структуру, но призмы были непрочные, легко распадающиеся на комки 1–3 см в диаметре. Карбонатно-иллювиальные горизонты Вк1 (30–90/60 см) были уже почти без корней, имели буровато-палевую окраску, пылевато-суглинистый гранулометрический состав, были пронизаны густой сетью тонких как вертикальных, так и горизонтальных трещин. Карбонатные горизонты Вк2 (90–170/80 см) имели более светлую окраску, чем Вк1, суглинистый гранулометрический состав, со 140 см в них были хорошо заметны выцветы солей. Почвообразующая порода С (170–250/80 см) имела буровато-палевую окраску, суглинистый гранулометрический состав и большое количество скопления гипса.

В результате обобщенная формула профиля почв данной микрокатены имела следующий вид: А–В1–Вк1–Вк2–С. Вскипание от HCl с 30 см. Название почв по Классификации почв СССР: каштановые солонцеватые [11], по WRB – Haplic Kastanozem (Loamic) [21]. Далее в тексте статьи будут даны пояснения классификационного положения отдельных разрезов микрокатены.

Основные методы, применяемые в данной работе – наблюдение, измерение и исследование. Для характеристики климата исследуемой территории использованы данные наблюдений за погодой на Эльтонской (1914–1939, 1946–1951 гг.) и Джаныбекской метеостанциях (1951–1968 гг.). К сожалению, климатические данные за период Второй мировой войны для этого региона отсутствуют. На основании имеющихся климатических данных в 2022 г. для периода 1914–1968 гг. рассчитывали среднемесячную и среднегодовую температуру воздуха, среднюю температуру воздуха в теплый и холодный период года, годовую сумму осадков, сумму осадков теплого и холодного периодов. Коэффициент увлажнения рассчитывали по методике Иванова [9]. Чтобы оценить состояние климата исследуемой территории к 1968 г., строили графики средней температуры, суммы осадков, коэффициента увлажнения по Иванову.

Содержание органического углерода определяли в 1968 г. по методу Тюрина [2] с применением фенилантраниловой кислоты в четырехкратной повторности для рыхлых образцов с глубины 0–10 и 10–20 см. Для определения состава легкорастворимых солей водную вытяжку из рыхлых образцов почвы, отобранных через каждые 10 см до глубины 2 м (верхние 10 см отобраны через 5 см), анализировали в 1968 г. по методике, описанной Аринушкиной [2]. Состав обменных катионов определяли в 1979 г. по методу Пфедфера [12] для рыхлых образцов, отобранных из горизонта А с тех же глубин, что и микромонолиты для изготовления почвенных шлифов. Шлифы изго-

товлены в Почвенном институте Э.Ф. Мочаловой в 1979 г. с применением канифоли в качестве пропитывающего состава [14]. Микроморфологические исследования проводили в 2022 г. по классическим методикам 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). Визуализация и измерение деталей микростроения проведены с помощью компьютерных программ, приложенных к микроскопу фирмы Olympus BX51 (Япония). Элементы микростроения описывали согласно международной терминологии, переведенной на русский язык [4, 22]. Вложенное изображение на рис. 2е получено путем синтезированной круговой поляризации в программе Thixomet Pro, методика подробно описана в Методическом руководстве [15].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

За период 1914–1968 гг. средняя температура воздуха в холодный период года составила  $-7.3^{\circ}\text{C}$ , в теплый период  $+16.0^{\circ}\text{C}$ , за год  $+7.4^{\circ}\text{C}$ . Среднегодовая сумма осадков в эти годы составляла 271.6 мм, минимальное значение 154.0 мм отмечено в 1934 г., максимальное  $- 659.8$  мм  $-$  в 1915 г. Сумма осадков холодного периода варьировала в диапазоне 16.1–259.7 мм, теплового периода  $-$  в диапазоне 77.7–480.1 мм. Средняя сумма осадков за холодное время года в период 1914–1968 гг. составляла 95 мм, за теплое время года  $-$  176.6 мм.

Анализируя многолетнюю изменчивость температуры воздуха, можно отметить для периода 1914–1968 гг. слабый тренд на уменьшение среднегодовой температуры, однако коэффициент корреляции линейной аппроксимации графика составляет всего 0.59, так что это снижение не является достоверным (рис. 1а). По сумме осадков также не наблюдается никаких значимых трендов ни по среднегодовому показателю, ни для теплового, ни для холодного периодов ( $R = 0.27, 0.27$  и  $0.37$  соответственно) (рис. 1б). Однако можно отметить, что в целом увлажнение данной территории крайне нестабильное: на один год с относительно повышенным количеством осадков

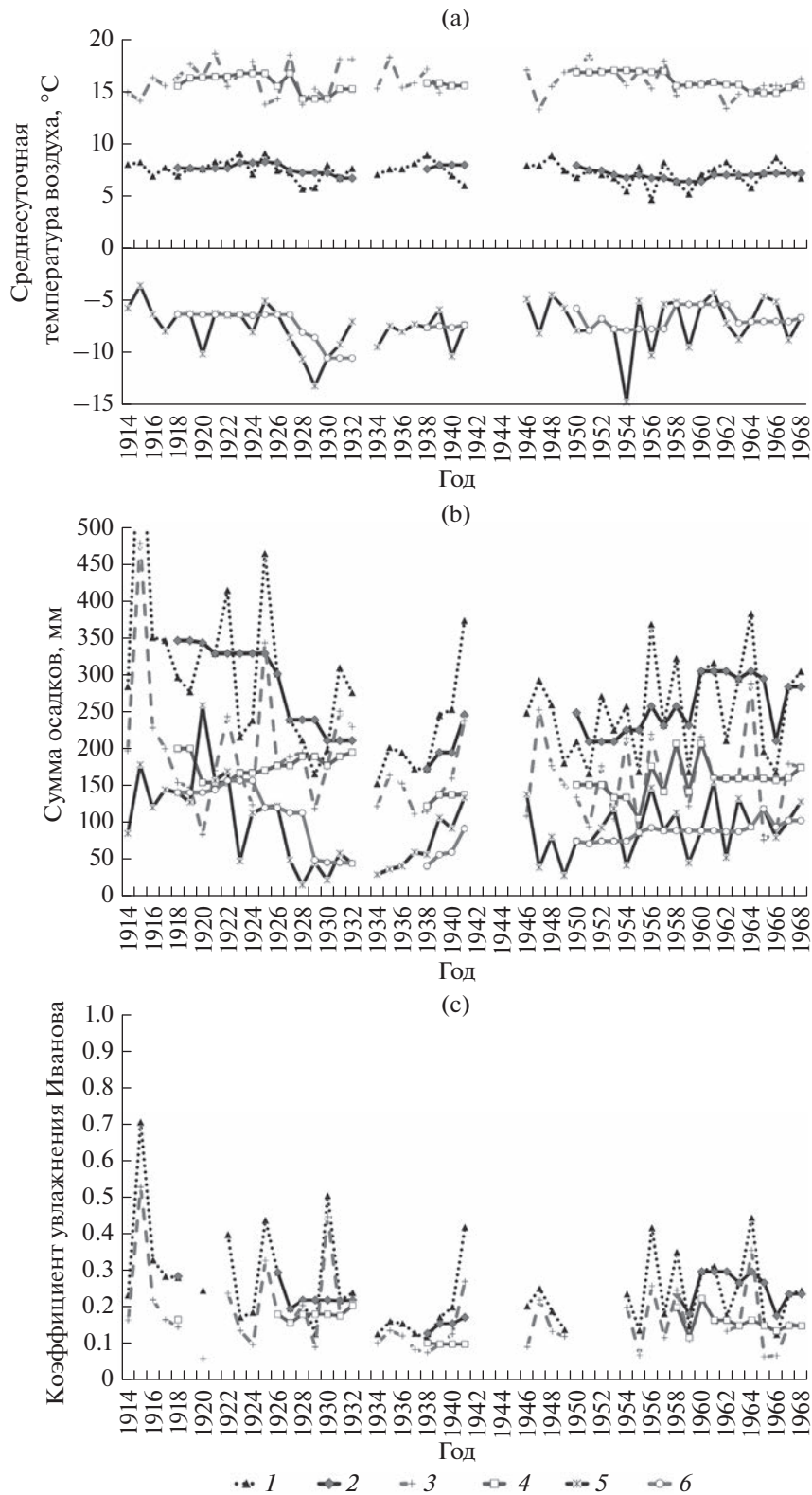
( $>300$  мм/год) приходится 2–3 года с пониженным количеством осадков ( $\approx 200$  мм/год).

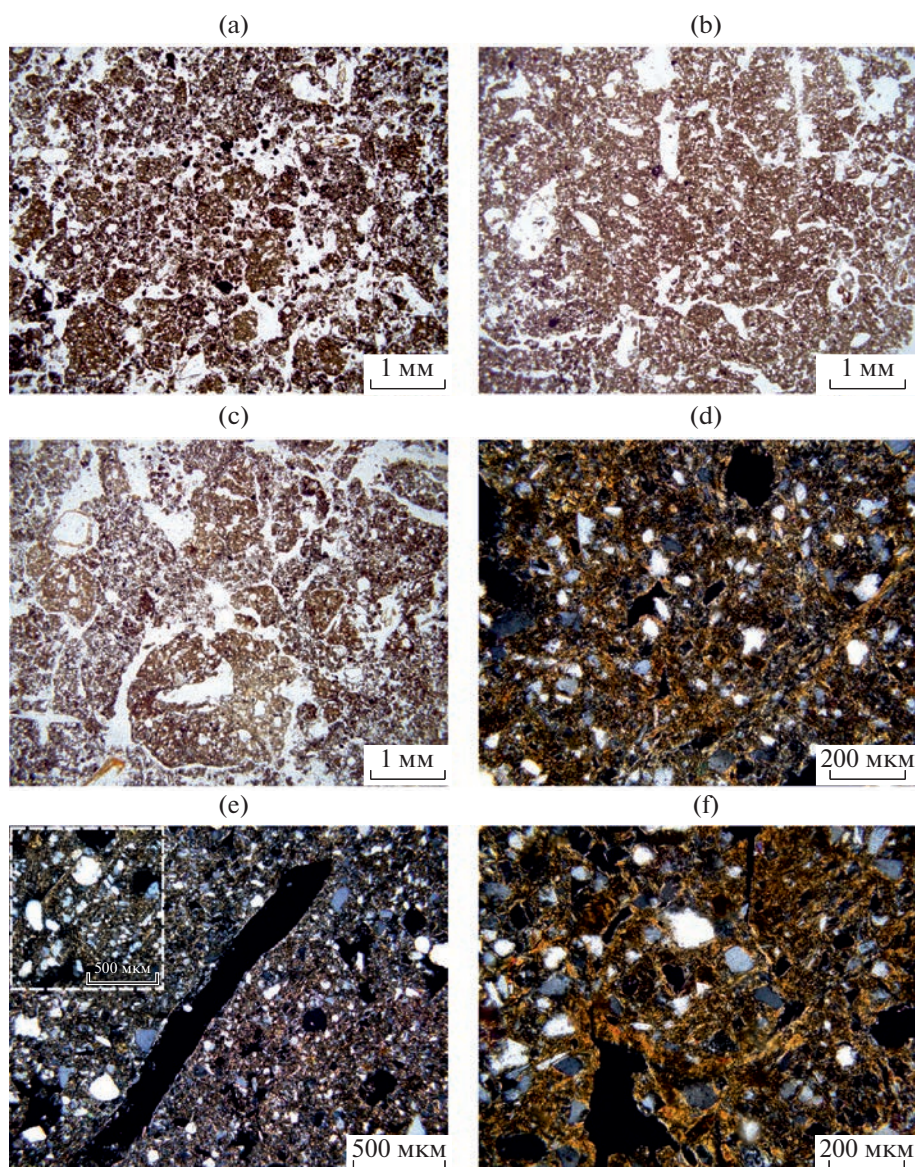
Многолетний цикл коэффициента Иванова, рассчитанного для теплового периода года и характеризующего отношение выпадающих осадков к испаряемости, также неоднородный и приблизительно совпадает с ходом многолетнего цикла осадков (рис. 1с), что следует непосредственно из формулы расчета. Однако можно отметить, что за 54-летний период наблюдений (вычитая годы, в которые наблюдений не было или их данные недоступны  $-$  44-летний) коэффициент Иванова не поднимался выше единицы, минимальное среднегодовое значение коэффициента Иванова в этот период  $-$  0.12, максимальное  $-$  0.34, среднее  $-$  0.21. Таким образом, территорию можно охарактеризовать как сильно засушливую. В целом проанализированные данные подтверждают характеристики, данные этой территории в литературе: климат засушливый [17], годы засух нередко следуют друг за другом, разделяясь более или менее длительными периодами удовлетворительного увлажнения, однако простой периодичности в появлениях засух установить нельзя [18]. Поэтому изученные почвы за 54 года, предшествующие отбору образцов, развивались в стабильных климатических условиях.

Содержание органического углерода в исследуемых почвах в слое 0–10 см составило 1.98%, в слое 0–20 см  $-$  1.26% (гумуса 3.41 и 2.00% соответственно). Такое содержание органического углерода характерно для каштановых почв данной территории [19]. Результаты определения состава обменных катионов представлены в табл. 1. Обращают на себя внимание несколько тенденций. Во-первых, доля кальция от суммы поглощенных оснований во всех изученных почвах в поверхностной толще меньше, чем в подповерхностной. Однако больше всего кальция и меньше всего натрия в почве разреза 3, расположенной в нижней части микросклона. В то же время в почве верхней части микросклона ситуация обратная: здесь больше всего натрия и меньше всего магния.

По содержанию обменного натрия в срединном бескарбонатном горизонте, который по призматической структуре можно было бы отнести к горизонту BSN по Классификации и диагностике почв России [10], почвы разрезов 3 и 4 можно

**Рис. 1.** Многолетний ход климатических показателей на Джаныбекской равнине с 1914 по 1968 гг. (обобщенные данные метеостанций Эльтон и Джаныбек): а  $-$  температура воздуха,  $^{\circ}\text{C}$ ; б  $-$  сумма осадков, мм; с  $-$  коэффициент увлажнения по Н.Н. Иванову. Обозначения легенды для а и б: 1  $-$  среднегодовые значения, 2  $-$  среднегодовые значения, график сглажен пятилетними скользящими медианами, 3  $-$  значения, усредненные за холодный период, 4  $-$  то же, график сглажен пятилетними скользящими медианами. Обозначения легенды для с: 1  $-$  коэффициент Иванова за год, 2  $-$  то же, график сглажен пятилетними скользящими медианами, 3  $-$  коэффициент Иванова за теплый период, 4  $-$  график сглажен пятилетними скользящими медианами. Примечание: для наглядности графика сумма осадков за 1915 г. не приводится (660 мм).





**Рис. 2.** Особенности микростроения верхних горизонтов каштановых солонцеватых почв микрокатены между I и II лентами гослесополосы Чапаевск–Владимировка (образцы отобраны в 1968 г., шлифы изготовлены в 1979 г., микроморфологическое описание выполнено в 2022 г.): а – разрез 3, 2–15 см, высокая биогенная агрегированность, PPL; б – разрез 3, 17–27 см, микросложение уплотненное, но с обилием биогенных пор-каналов, PPL; с – разрез 4, 2–12 см, высокая биогенная агрегированность, PPL; д – разрез 4, 14–22 см, тонкая слоистая гипокутана, XPL; е – разрез 5, 2–12 см, тонкие струйки оптически ориентированного тонкодисперсного глинистого вещества, приуроченные к порам, XPL; ф – разрез 5, 12–19 см, слоистые гипокутаны, XPL.

отнести к малонатриевым солонцам, почву разреза 5 – к средненатриевому солонцу [10].

На микроуровне *верхние части гумусовых горизонтов* изученных почв отличаются высокой биогенной агрегированностью (табл. S1, рис. 2а), которая, однако, уменьшается вверх по микроскелону (по мере приближения к микроповышению). В горизонте А разреза 3 (2–15 см) глинисто-гумусовое тонкодисперсное вещество (ТДВ) встречается микрозонально, в этих зонах преобладает вокругскелетная ориентация ТДВ, струйчатая

встречается единично, в тех агрегатах, где ТДВ гумусово-глинистое. Также в этом горизонте много разнообразных экскрементов микрофауны и встречаются мелкие фитоциты (табл. S2). Горизонт А (2–12 см) разреза 4 отличается тем, что в нем, по сравнению с разрезом 3, глинистые агрегаты встречаются чаще и имеют большие размеры (рис. 2с), а в отдельных порах отмечены скопления отмытых минеральных зерен. Гумусовый горизонт разреза 5 (2–15 см) отличается меньшей степенью биогенной проработки: более уплот-

**Таблица 1.** Содержание обменных катионов в верхнем горизонте каштановых солонцеватых почв микрокатоны между I и II лентами гослесополосы Чапаевск–Владимировка (образцы отобраны в 1968 г., анализ выполнен в 1979 г.)

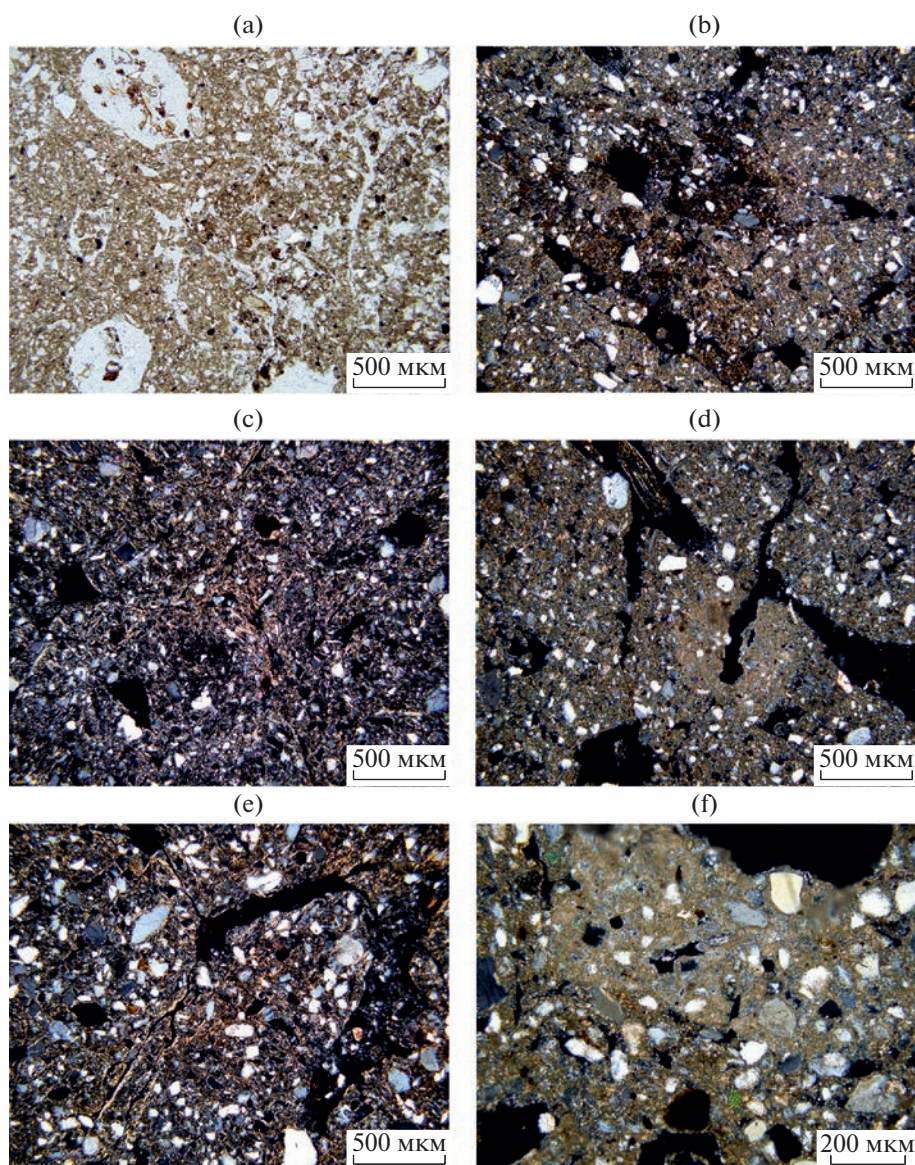
Разрез	Глубина отбора образца, см	Содержание иона, смоль(экв)/кг				Сумма, смоль(экв)/кг	% от суммы			
		Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>		Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>
3	2–15	12.06	6.11	0.71	0.43	19.31	62.4	31.6	3.7	2.2
	17–27	16.88	7.80	0.35	0.41	25.44	66.3	30.7	1.4	1.6
4	2–12	9.12	5.03	0.40	0.69	15.24	59.8	33.0	2.6	4.5
	14–22	15.19	9.41	0.33	4.78	29.71	51.1	31.7	1.1	16.1
5	0–12	5.46	2.74	0.25	1.08	9.53	57.3	28.7	2.6	11.3
	12–19	11.41	4.64	0.33	8.26	27.64	41.3	27.4	1.2	29.9

ненная, слабо выраженная округло-блоковая микроструктура, слабо выраженная комковатая микроструктура, экскременты микрофауны единичны. Особенности этого горизонта являющегося сплошной вокругскелетная ориентация глинистого ТДВ; появление тонких глинистых струек, тяготеющих к поверхностям агрегатов – свидетельство повышенной подвижности глинистого ТДВ (рис. 2е).

Сильнее проявляется неоднородность почвенных профилей в нижних частях гумусового горизонта. В разрезе 3 в нижней части микросклона на глубине 17–27 см наблюдается более низкая гумусированность по сравнению с вышележащей толщей, биогенная агрегированность высокая, но материал уплотненный (рис. 2б). Агрегаты высокого порядка – округло-блоковые – состоят из уплотненных биогенных агрегатов: комковатых и зернистых. Оптическая ориентация ТДВ преобладает вокругскелетная и раздельно-чешуйчатая, единично встречаются тонкие короткие струйки. В разрезе 4 на глубине 14–22 см округло-блоковая микроструктура сильно выражена. Эта толща имеет явные признаки солонцеватости: глинисто-гумусовое ТДВ подвижное. Преобладает раздельно-чешуйчатая и струйчатая оптическая ориентация ТДВ, встречается перекрестно-волоконистая и вокругскелетная. Струйчатая оптическая ориентация глинистого ТДВ здесь возникает, вероятно, при смыкании пор, покрытых тонкими кутанами (рис. 2д). Почва в разрезе 5 на глубине 12–19 см имеет наиболее выраженную в ряду изученных почв округло-блоковую микроструктуру, хорошо аккомодированную. ТДВ можно отнести к глинистому, гумуса совсем мало, он встречается в виде точечного гумуса. Преобладает перекрестно-волоконистая оптическая ориентация ТДВ, вокругскелетная почти не встречается. Отмечаются сложные микрослоистые гипокутаны (рис. 2ф), образующиеся вследствие процессов набухания-усадки, и в небольшом количестве тонкие микрослоистые иллювиальные кутаны, что позволяет сказать о развитии солонцового процесса в этой

почве на момент наблюдения. Наряду с увеличением выраженности солонцового процесса наблюдается уменьшение активности микрофауны: если в разрезе 3 на глубине 17–27 см множество биогенных инфиллингов, состоящих из округлых и эллипсоидных экскрементов, то в разрезе 5 на глубине 12–19 см в шлифе отмечен лишь один растительный остаток с несколькими экскрементами клещей внутри.

*Горизонты VI.* В разрезе 3 на глубине 27–37 см отмечается высокая биогенная переработка, что отражается в обилии копрогенных гумусированных агрегатов (рис. 3а), из них некоторые имеют ожелезненное ТДВ (размер таких агрегатов до 150 мкм), растительные остатки в порах тоже ожелезненные. Преобладает вокругскелетная ориентация глинистого ТДВ, встречаются элементы струйчатой и перекрестно-волоконистой, единично тонкие глинистые струйки залегают по граням агрегатов, что позволяет говорить о слабом проявлении на момент отбора образца солонцового процесса, а горизонту присвоить признак солонцеватости sp. В разрезе 4 на глубине 23–31 см микроструктура округло-блоковая, единично встречаются микрзоны копрогенной микроструктуры, занесенный глинисто-железистый обломок агрегата с включениями пыли и тонкого песка. Поскольку такого материала нет во внутриведной массе, можно предполагать, что этот обломок занесен биотой из опесчаненных прослоев, из которых не были отобраны образцы для шлифов. Преобладает вокругскелетная и раздельно-чешуйчатая оптическая ориентация ТДВ, глинистые струйки на гранях агрегатов встречаются чаще, чем в разрезе 3 (рис. 3с). Единично в порах встречаются отмытые зерна кварца без пленок. Почва разреза 5 на глубине 20–28 см имеет массивную микроструктуру, глинистые струйки по граням агрегатов и сомкнутым порам толще, чем в разрезе 4 (рис. 3е), а размер чешуек глинистого ТДВ больше, что позволяет охарактеризовать этот горизонт по микростроению как солонцовый и присвоить этому горизонту индекс BSN



**Рис. 3.** Особенности микростроения срединных горизонтов каштановых солонцеватых почв микрокатены между I и II лентами гослесополосы Чапаевск–Владимировка: а – разрез 3, 27–37 см, высокая биогенная агрегированность, PRL; б – разрез 3, 40–47 см, микрizona с глинисто-гумусовым тонкодисперсным веществом, основная масса имеет кристаллитовую оптическую ориентацию тонкодисперсного вещества, XPL; в – разрез 4, 23–31 см, струйчатая оптически ориентированная глина, приуроченная к порам и граням агрегатов, XPL; д – разрез 4, 35–45 см, микрительное стяжение вокруг биогенной поры, XPL; е – разрез 5, 20–28 см, тонкие струйки оптически ориентированного тонкодисперсного глинистого вещества, приуроченные к порам, XPL; ф – разрез 5, 30–38 см, микрительное стяжение – начало формирования белоглазки, XPL.

(рис. S2) по Классификации и диагностике почв России [10]. Деятельность фауны в этом слое во всех почвах слабо выражена.

*Горизонты Вк<sub>1</sub>.* Почва разреза 3 на глубине 40–47 см имеет микроструктуру, сочетающую зоны округло-блоковой, зернистой и губчатой, глинисто-карбонатное ТДВ с кристаллитовой оптической ориентацией. Единично встречаются зоны с меньшим содержанием карбоната кальция, в них

оптическая ориентация ТДВ вокругскелетная. Биогенная проработка проявляется в наличии эксcrementов клещей в биогенных порах и микрозональной пропитки внутрительной массы (ВПМ) почти черным органическим веществом по ассимилированным разложившимся растительным остаткам (рис. 3б). Также в этом горизонте в ВПМ появляются зерна первичного кальцита. Наличие только карбонатной пропитки микритом данного горизонта позволяет рассматривать его как ВМК.

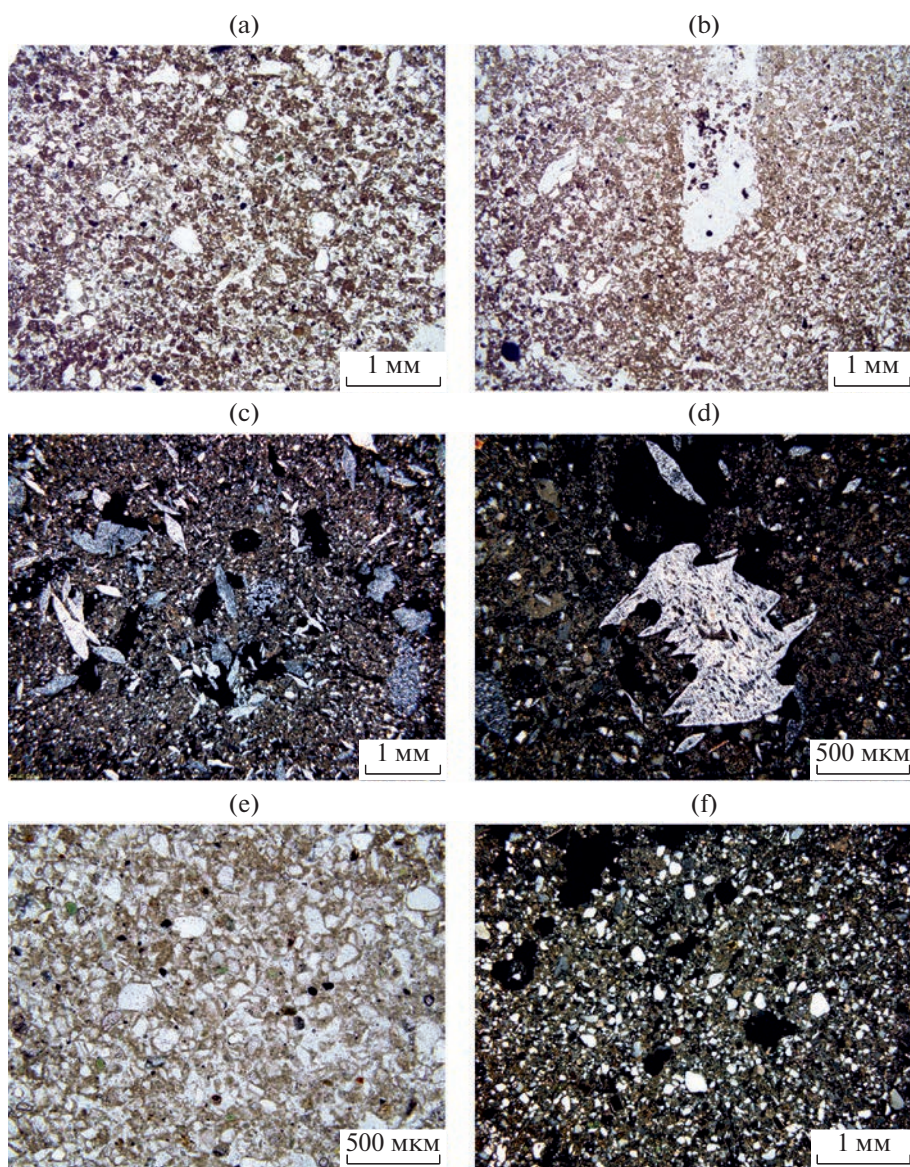
В почвенной массе разреза 4 на глубине 35–45 см микроструктура уплотненная, ваговая, с микрозонами комковатой. Отмечен биогенный ход с копролитами из глинистого материала вышележащего горизонта. Заметна кольцевая ориентация скелетных зерен размерности мелкого песка. Такая сортировка крупных фракций, вероятно, является реликтовым признаком, поскольку ее связывают с длительным промерзанием отложений. Особенностью этого почвенного слоя является также появление карбонатных новообразований (микритовое стяжение вокруг биогенной поры – рис. 3d), что позволяет рассматривать его как горизонт ВСА. В разрезе 5 на глубине 30–38 см микроструктура массивная, пронизанная биогенными каналами. ТДВ глинисто-карбонатное с кристаллитовой оптической ориентацией. Единично отмечена микрозона с повышенной концентрацией микритовой пропитки, что является начальной стадией формирования карбонатного стяжения и также позволяет рассматривать этот горизонт как ВСА (рис. 3f).

*Горизонты Вк<sub>2</sub>*. На глубине 110–120 см в разрезе 3 микроструктура ваговая, состоящая из мелких комковатых агрегатов, уплотненных между собой. Их размер одинаков – приблизительно 100 мкм (рис. 4а). Есть более рыхлые и более плотные микрозоны. Много биогенных каналов, вокруг которых почвенный материал уплотнен. Единично отмечена микрозона с экскрементами (рис. 4b). ТДВ карбонатно-глинистое, образует мелкие комки, описанные выше, преимущественно без силикатных зерен внутри, однако иногда встречаются зерна, “одетые” пылеватой карбонатно-глинистой пленкой. Большая часть силикатных зерен в пленках глинистого ТДВ. В ВПМ встречаются зерна первичного кальцита. Отмечена тенденция к формированию тонких прослоек песка, что свидетельствует о неоднородности почвообразующего материала. В разрезе 4 на этой же глубине почвенный материал заметен более рыхлый, микроструктуру можно охарактеризовать как слабовыраженную комковатую и зернистую. Обращает на себя внимание обилие гипса в этом горизонте – множество инфиллингов, состоящих из гипсовых кристаллов разных генераций, преобладает ангидрид. Полагаем, что именно обилие гипса, кристаллы которого раздвигают почвенную массу вокруг себя, привело к формированию такой специфической микроструктуры – отдельности неправильной формы, комки и зерна слабо выражены (рис. 4с, 4d). В разрезе 5 на глубине 110–120 см микроструктура массивная с обилием ваг и каналов, однако заметно, что в микроструктуре присутствуют уплотненные мелкие пылеватые комки и песчаные зерна в пленках пылеватого материала, как и в разрезе 3 (рис. 4е). Так же, как в разрезе 3, отмечается тенденция к формированию по-разному ориентированных

тонких прослоек песка и к кольцевой его сортировке (рис. 4f). Гипса и признаков деятельности микрофауны на глубине 110–120 см в разрезе 5 в данном образце не отмечено. Вероятно, на глубине 100–120 см начинается почвообразующая порода – горизонт С (рис. S2) – с микропризнаками криогенной сепарации и микрослоистости по песку с реликтовым почвенными признаками – крупные сростки гипса с признаками разрушения и микроагрегированность лёссовой размерности (рис. 4а, 4b, 4d).

При анализе солевых профилей исследуемых почв (рис. 5) отмечается следующая закономерность: содержание сульфат-ионов и натрия существенно увеличивается с повышением положения почвы вверх по микросклону. Относительно повышенное содержание сульфат-иона и иона натрия наблюдается в профиле разрезов 4 и 5, начиная с глубины в 1 м (4.69 и 11.10 смоль(экв)/кг соответственно). Несколько повышено содержание иона хлора во втором метре разреза 5 (3.64 смоль(экв)/кг на глубине 120 см) и в целом солевой профиль этого разреза похож на солевой профиль глубокого или остепняющегося солонца, описанный Роде и Польским [17]. В разрезе 3 слабое сульфатно-натриевое с участием соды засоление появляется только на глубине 150–160 см (общая сумма солей 0.17%, сумма токсичных солей 0.15%). В самой нижней части профиля засоление хлоридно-сульфатное, но все еще слабое, гипса нет, присутствует сода и магний, натрий, наибольшая общая сумма солей 0.22% на глубине 170–180 см (сумма токсичных солей на этой глубине составляет 0.17%). В разрезе 4 слабое сульфатное с участием соды натриевое засоление проявляется уже на глубине 60–70 см (общая сумма солей 0.25%, сумма токсичных солей 0.21%), на глубине 90–100 см засоление уже средней степени, сульфатное с участием соды магниевое-натриевое (общая сумма солей 0.26%, сумма токсичных солей 0.24%), сменяется сильным на глубине 140–150 см (общая сумма солей 0.53%, сумма токсичных солей 0.51%). Во всем профиле присутствует сода, гипс в химизме засоления проявляется только на глубине 190–200 см (0.314% растворенного гипса). Магний в химизме засоления имеется в слоях 70–100, 140–150 и 190–200 см (1, 1.6 и 2.6% токсичного Mg соответственно). В разрезе 5 слабое засоление, содово-сульфатное натриевое, проявляется немного выше (на глубине 40–50 см общая сумма солей 0.21%, сумма токсичных солей 0.17%), сода также участвует в химизме засоления в слое 70–100 см. Уже на глубине 100–110 см засоление сильное (общая сумма солей 1.01%, сумма токсичных солей 0.95%), хлоридно-сульфатное натриевое, сода пропадает, со 110 см – очень сильное (общая сумма солей 1.25%, сумма токсичных солей 1.17%) сульфатное с гипсом натриевое, со 120 см добавляется магний (4 смоль(экв)/кг ток-



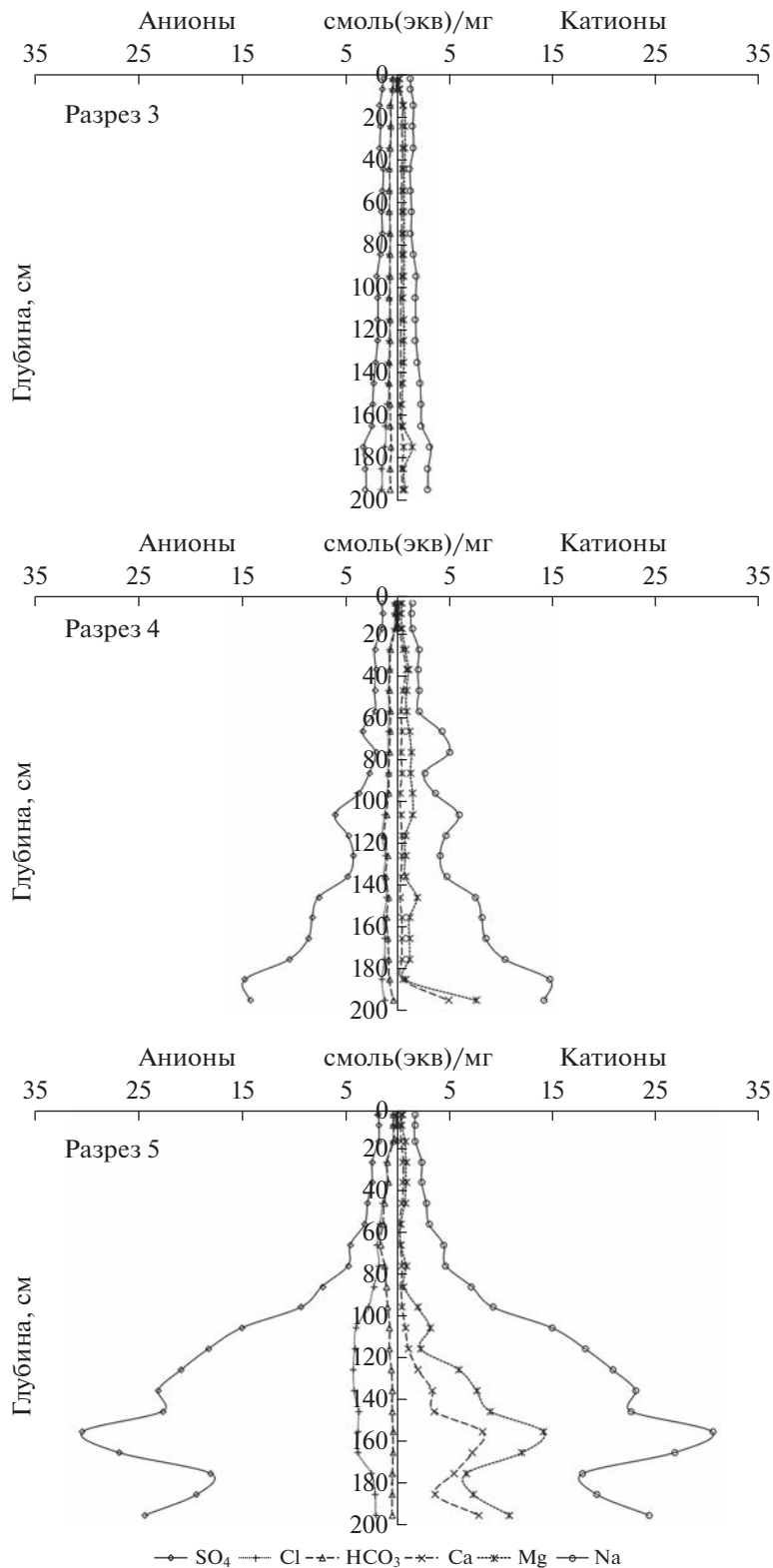


**Рис. 4.** Особенности микростроения нижних горизонтов каштановых солонцеватых почв микрокатены между I и II лентами гослесополосы Чапаевск–Владимировка: а, б – разрез 3, 110–120 см, лёссовидный материал (а) и экскременты микрофауны в биогенной поре (б), PPL; с, d – разрез 4, 110–120 см, разнообразие форм гипса: инфиллинги, отдельные кристаллы (с), крупный разрушающийся сросток (d), XPL; (e, f) – разрез 5, 110–120 см, уплотненные лёссовидные агрегаты (e), кольцевая сортировка песчаных зерен (f), XPL.

сичного Mg), со 150 см добавляется гипс (растворенного гипса 0.537%). Таким образом, в составе солей в разрезе 5 больше доля соды и магния, чем в разрезе 4.

Таким образом, при микроморфологическом изучении шлифов светло-каштановых солонцеватых почв выявлены следующие тенденции. Вверх по склону происходит уменьшение биогенной проработки почв как по глубине, так и по интенсивности. При этом в разрезе 3, расположенном в нижней точке микросклона, признаки биогенной активности обнаружены даже на глубине

110–120 см. С другой стороны, вверх по склону закономерно увеличивается интенсивность проявления солонцового процесса. В разрезе 5, находящемся в верхней части микросклона, глинистые струйки, приуроченные к поверхностям пор, появляются уже в горизонте А, который, судя по элементам микростроения и по содержанию обменного натрия, можно охарактеризовать как средненатриевый солонцовый горизонт (2–12 см). Почва разреза 4 занимает промежуточное положение не только физически, но и по выраженности обозначенных выше процессов. По промытости от карбонатов, наличию глинистых тонких кутан и со-



**Рис. 5.** Солевые профили каштановых солонцеватых почв микрокатены между I и II лентами гослесополосы Чапаевск–Владимировка (отбор образцов и анализ водной вытяжки выполнены в 1968 г., графики составлены в 2022 г.), концентрация солей приводится в соль(экв)/кг почвы.

держанию обменного натрия 16.1% слой 14–22 см этой почвы можно охарактеризовать как солонцовый горизонт BSN малонатриевый. Особенностью этого разреза является также и то, что на глубине 110–120 см здесь отмечается множество скопленных разновозрастных кристаллов гипса. Вероятно, в разрезе 5 гипсовые новообразования не попали в отобранный для шлифа образец, хотя их присутствие позволяет предполагать состав водной вытяжки (рис. 5).

По Классификации и диагностике почв России [16] верхние горизонты изученных почв можно отнести к диагностическому горизонту AJ. По Классификации и диагностике почв СССР [11] из изученных почв только классификационное положение почвы разреза 3 можно назвать не вызывающим дискуссий: по содержанию гумуса и мощности гумусового горизонта можно отнести ее к каштановым маломощным, а содержание обменного натрия в ней так мало, что отнести ее даже к слабосолонцеватым не представляется возможным. По WRB [21] эта почва относится к *Harlic Kastanozem (Loamic)*.

В разрезах 4 и 5 не все так однозначно. Содержание обменного натрия в них повышенное в приповерхностной толще (на глубине 12(14)–22(25) см), причем настолько, что выходит за пределы, установленные для сильносолонцеватых каштановых почв классификацией почв СССР [11], что позволяет их отнести к солонцам. По классификации почв России [10] почвы разрезов 4 и 5 можно отнести к разным видам солонцов по содержанию обменного натрия – малонатриевым (разрез 4) и средненатриевым (разрез 5). При этом по мощности гумусового горизонта без обменного натрия (мощности надсолонцовой толщи) их можно отнести к средним солонцам. По наличию агрегатов с признаками подвижности глины в этих горизонтах (вокругскелетная оптическая ориентация глинистого ТДВ) можно предположить активное зоогенное перемешивание материала.

Судя по тому, что сумма обменных магния и натрия в слое 14–22 см разреза 4 и слое 12–19 см разреза 5 превышает содержание обменного кальция, а самого обменного натрия больше 15%, эти слои могут считаться горизонтами *натрик* по WRB [21]. Высокая оптическая ориентация глинистого тонкодисперсного вещества и наличие тонких глинистых кутан в шлифах из этих слоев также подтверждает эту гипотезу. Однако для точного вывода о принадлежности горизонта и, соответственно, для отнесения этих двух разрезов к реферативной почвенной группе *Solonetz* данных недостаточно – необходимо более подробное полевое описание и данные по гранулометрическому составу всех изученных почв. К сожалению, такими всеобъемлющими данными не располагаем, поэтому классификационное по-

ложение этих почв с точки зрения Мировой реферативной базы почвенных ресурсов остается дискуссионным. Однако факт проявления солонцового процесса в почвах изученной микрокатены в 1968 г. сложно подвергать сомнению, учитывая проанализированные нами данные. По высокой биогенной микроагрегированности и характеру органического вещества в гумусовых горизонтах изученные почвы разрезов 4 и 5 можно отнести к остепняющимся солонцам, которые являются промежуточной стадией эволюции от солонца к каштановой почве [8]. Роде [17] писал, что признаками остепнения солонцов является наличие гумусового горизонта большой мощности, текстурной дифференциации профиля без выраженных глинисто-гумусовых кутан, отсутствие обменного натрия в почвенном поглощающем комплексе. В связи с этим можно предположить, что в изученных почвах на момент отбора образцов в 1968 г. процесс остепнения находился на самой ранней стадии развития.

Как известно, солонцеватые, солонцовые и осолоделые морфоны и горизонты выражены в разных типах почв комплекса в различной степени [13], что связано с общими эволюционными трендами развития ландшафтов Прикаспийской низменности и локальными изменениями, связанными с деятельностью почвенных животных, возможной динамикой микрорельефа из-за исходно разного содержания солей в почвообразующем материале и колебаниями уровня грунтовых вод [1, 20]. Поскольку текущие тренды отражаются в особенностях микроструктур, текстурных и солевых новообразованиях, а более давние – в свойствах глинистой плазмы, то необходимо заложение новых разрезов проводить с учетом положения почв по микро- и нанорельефу и вблизи ранее изученных. Для проведения мониторинговых исследований по изменению свойств этих почвенных комплексов необходимо проводить детальную морфологическую характеристику и фотофиксацию основных особенностей генетических горизонтов, сопровождая их физико-химическими исследованиями.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучены почвы солонцового комплекса на микросклоне длиной 229 см с перепадом высот между крайними точками разреза 3.6 см, расположенного между I и II лентами гослесополосы Чапаевск–Владимировка. Несмотря на очень малый перепад высот, почвы существенно различаются по физико-химическим и микроморфологическим признакам. Подобные быстрые изменения свойств солонцов с перепадом высот в 2 см по траншее были отмечены и ранее для территории заповедной степи на стационаре [13].

В траншее при микроморфологическом изучении почв, образцы которых отобраны в 1968 г., выявлены признаки активного солонцового процесса, особенно сильно проявляющиеся в профиле почвы в верхней части микросклона и выражающиеся в наличии глинистых кутан по граням структурных отдельностей и в перекрестно-волокнистой оптической ориентации глинистого тонкодисперсного вещества во внутрипедной массе. В профиле почвы в средней части микросклона эти признаки выражены слабее, однако в обеих этих почвах наличие солонцового процесса подтверждается высоким содержанием обменного натрия в составе обменных катионов на тех же глубинах, где на микроуровне отмечены глинистые кутаны. Вместе с тем вниз по склону увеличивается число проявлений активности почвенных животных в изученных почвах, максимальны они в почве нижней части склона. В ней же в верхней части профиля отмечено минимальное содержание обменного натрия и отсутствие кутан, перекрестно-волокнистая оптическая ориентация тонкодисперсного вещества отмечена только в отдельных агрегатах, которые, по-видимому, занесены сюда выбросами почвенных животных из почв, расположенных немного выше по микросклону. По Классификации и диагностике почв СССР [11] эта почва относится к каштановым маломощным, по WRB [21] – к *Na*plc *Kastanozem*. Классификационное положение почв верхней и средней части микросклона неоднозначно, по своим свойствам они ближе всего к описанным в литературе солонцам.

#### БЛАГОДАРНОСТЬ

Коллектив авторов статьи выражает благодарность Н.Б. Хитрову за помощь в расчетах климатических показателей и Г.С. Базыкиной за предоставленные данные метеорологических наблюдений.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

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

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

#### ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Рис. S1. Схема продольного профиля микрокатены каштановых солонцеватых почв между I и II лентами гослесополосы Чапаевск–Владимировка (составлена В.А. Девярых в 1968 г.).

Таблица S1. Описание микроструктуры, пор, микросложения, тонкодисперсной массы и кутан в каштановых солонцеватых почвах между I и II лентами го-

слесополосы Чапаевск–Владимировка (образцы отобраны в 1968 г., шлифы изготовлены в 1979 г., микроморфологическое описание выполнено в 2022 г.).

Таблица S2. Описание органического вещества, эксcrementов, инфиллингов и нодулей в каштановых солонцеватых почвах между I и II лентами гослесополосы Чапаевск–Владимировка (образцы отобраны в 1968 г., шлифы изготовлены в 1979 г., микроморфологическое описание выполнено в 2022 г.).

Рис. S2. Схема почвенных горизонтов микрокатены каштановых солонцеватых почв между I и II лентами гослесополосы Чапаевск–Владимировка (составлена в 2022 г. на основе схемы, выполненной В.А. Девярых в 1968 г.). Красный шрифт – индексы по Классификации и диагностике почв СССН, 1977 и глубины горизонтов по обобщенному полевому описанию почв микрокатены, которые соединены красными пунктирными линиями; черный шрифт – индексы по Классификации и диагностике почв России, 2004, черные штрихи отмечают границы отбора образцов монолитов, по шлифам которых установлены индексы по современной классификации.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Абатуров Б.Д.* Западный микрорельеф Прикаспийской низменности и механизмы его формирования // *Аридные экосистемы*. 2010. Т. 16. № 45. С. 31–45.
2. *Аринушкина Е.В.* Руководство по химическому анализу почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1961. 491 с.
3. *Большаков А.Ф.* Почвы и микрорельеф Прикаспийской низменности // *Мат-лы изысканий, исследований и проектирования ирригации Заволжья*. Вып. VII. Солонцы Заволжья. М., 1937. С. 134–169.
4. *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.
5. *Глобальные изменения климата и прогноз рисков в сельском хозяйстве России*. М.: Российская академия сельскохозяйственных наук, 2009. 518 с.
6. *Девярых В.А.* Генетические особенности почв солонцового комплекса Северо-Западного Прикаспия. Автореф. дис. ... канд. биол. н. М., 1970. 17 с.
7. *Земельные ресурсы. Всемирный обзор. Первое издание* // *Конвенция Организации Объединенных Наций по борьбе с опустыниванием (United Nations Convention to Combat Desertification)*, 2017. 338 с.
8. *Иванов И.В., Демкин В.А., Губин С.В., Мамонтов В.И.* Развитие почв бессточной равнины Северного Прикаспия в голоцене // *Почвоведение*. 1982. № 1. С. 5–17.
9. *Иванов Н.Н.* Об определении величин испаряемости // *Изв. Всесоюзного географического общества*. 1954. Т. 86. № 2. С. 189–196.
10. *Классификация и диагностика почв России*. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.

11. Классификация и диагностика почв СССР. М.: Колос, 1977. 224 с.
12. Кожевников К.Я. Быстрый и точный метод определения емкости поглощения в карбонатных почвах // Почвоведение. 1960. № 2. С. 100–102.
13. Лебедева (Верба) М.П., Герасимова М.И. Макро- и микроморфологические особенности генетических горизонтов почв солонцового комплекса Джаныбекского стационара // Почвоведение. 2009. № 3. С. 259–272.
14. Мочалова Э.Ф. Изготовление шлифов из почв с нарушенным строением // Почвоведение. 1956. № 10. С. 98–100.
15. Плотникова О.О., Куст П.Г., Романис Т.В., Лебедев М.А. Методическое руководство по компьютерному анализу изображений почвенных шлифов с использованием программного обеспечения Thixomet Pro. М., 2022. 61 с.
16. Полевой определитель почв России. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 2008. 182 с.
17. Роде А.А., Польский М.Н. Почвы Джаныбекского стационара, их морфологическое строение, механический и химический состав и физические свойства // Почвы полупустыни Северо-Западно-го Прикаспия и их мелиорация. 1961. Т. 56. С. 3–214.
18. Селянинов Г.Т. Происхождение и динамика засух // Засухи в СССР, их происхождение, повторяемость и влияние на урожай. 1958. С. 5–30.
19. Сиземская М.Л. Современная природно-антропогенная трансформация почв полупустыни Северного Прикаспия. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2013. 276 с.
20. Хитров Н.Б. Изменение микрорельефа и почвенного покрова солонцового комплекса за вторую половину XX века // Почвы, биогеохимические циклы и биосфера. Развитие идей Виктора Абрамовича Ковды. К 100-летию со дня рождения. М.: Тов-во научных изданий КМК, 2004. С. 324–342.
21. 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).
22. Stoops G. Guidelines for analysis and description of soil and regolith thin sections. John Wiley & Sons (Publ.), 2021. 240 p.

## Micromorphological Characterization of Soils of the Solonetzic Complex (Dzhanybek Plain)

O. O. Plotnikova<sup>1</sup>\*, M. P. Lebedeva<sup>1</sup>, P. R. Tsymbarovich<sup>1</sup>, and V. A. Devyatkh<sup>1</sup>

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

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

A comparative analysis of physico-chemical and micromorphological properties in samples of 1968 sampling from virgin soils of the dry-steppe saline complex as the starting point of the 1968–2022 chronosequence was carried out. The study of climatic parameters for the period 1914–1968 showed that in the 54 years preceding the sampling, soils developed in relatively stable climatic conditions. Analysis of soil properties showed that on an almost flat area with a height difference of only 3.6 cm at a distance of 229 cm, soils differ significantly in depth and degree of salinity, degree of solonetzization, set of humus microforms and organic matter content, presence and size of clay coatings, degree of mobility of micromass. This confirms the patterns of moisture redistribution described in numerous studies in this area, even with very small elevation differences. Based on the set of available indicators, it can be concluded that soils of the microcatena are belong to different taxonomic units. The soil of the lower part of the microslopes according to the USSR Soil Classification (1977) can be attributed to light chestnut soil, according to the international classification WRB (2015) it can be attributed to Haplic Kastanozem (Loamic). Soils with a high content of exchangeable sodium and the presence of clay coatings, located in the middle and upper parts of the microslopes, according to both classifications belong to Solonetz.

*Keywords:* climate, Caspian Lowland, stepficated solonetz, soil evolution, soil genesis