

ЭРОЗИОННО-АККУМУЛЯТИВНАЯ СТРУКТУРА ПОЧВЕННОГО ПОКРОВА СУХОСТЕПНОГО АГРОЛАНДШАФТА, РОСТОВСКАЯ ОБЛАСТЬ

© 2024 г. Н. Б. Хитров^{a,*} (<https://orcid.org/0000-0001-5151-5109>),
Е. И. Кравченко^a (<https://orcid.org/0000-0003-4609-5650>),
Д. И. Рухович^a (<https://orcid.org/0000-0002-8002-0698>),
П. В. Королева^a (<https://orcid.org/0009-0000-0689-4621>)

^aПочвенный институт им. В.В. Докучаева, Пыжевский пер., 7, стр. 2, Москва, 119017 Россия
^{*}e-mail: khitrovn@gmail.com

Поступила в редакцию 14.02.2024 г.

После доработки 18.03.2024 г.

Принята к публикации 10.04.2024 г.

Представлены результаты наземного исследования эрозионно-аккумулятивной структуры почвенного покрова ключевого участка и проведена оценка информативности мультिवременных данных дистанционного зондирования открытой поверхности почв для ее выявления и картографирования в зоне распространения темно-каштановых почв. Участок расположен на Миллерово-Морозовской наклонной равнине в пределах Доно-Донецкой холмисто-грядовой равнины, Обливский район Ростовской области. Почвенный покров ключевого участка представлен сочетанием разных вариаций малококонтрастных почв на выпуклых и вогнутых поверхностях в пределах вытянутой гряды и ее склонов, включающих агротемно-каштановые солонцеватые и несолонцеватые почвы, агроземы (смытые почвы, потерявшие ксерометаморфический горизонт), стратоземы (сильнонамытые почвы). Формирование структуры почвенного покрова обусловлено сочетанием форм мезорельефа и двух видов почвообразующих пород. Карта коэффициента *S* мультिवременной линии почв выявляет неоднородность почвенного покрова, обусловленную проявлением эрозионно-аккумулятивных процессов. На исследуемом ключевом участке существенно отличаются три контрастные почвенные комбинации в виде разных вариаций и сочетания-вариаций, образующие своеобразный каркас структуры почвенного покрова. Почвенные комбинации смытых и намытых почв, расположенные между указанными выше тремя группами почвенных комбинаций, значительно отличаются от соседей, но их интерпретация имеет повышенную неопределенность.

Ключевые слова: темно-каштановые почвы, стратоземы, смытые почвы, слитизированные почвы, Narlic Kastanozems, открытая поверхность почв, спектральная окрестность линии почв, мультिवременная линия почв

DOI: 10.31857/S0032180X24090018, **EDN:** WMEEWL

ВВЕДЕНИЕ

Развитие цифровой картографии привело за последние десятилетия к детектированию пространственной неоднородности почвенного покрова на основе новых материалов и методов их обработки [35]. В составлении карт видов деградации почв удастся применить методы обработки больших данных дистанционного зондирования и нейронные сети [92]. Критерием качества новых методов остается анализ наземных

характеристик, получаемых при полевых изысканиях [93].

Существуют различные методы распознавания причин неоднородности почвенного покрова, которые можно сгруппировать по основным принципам исследования: традиционные наземные [26, 44], моделирование [72, 74, 80, 82, 99] на основе обработки цифровых моделей рельефа [4, 19, 23, 46, 97, 98] и климатических данных [89, 94], обработка данных дистанционного зондирования (ДДЗ). При обработке ДДЗ могут использоваться

отдельные снимки [66, 85, 99, 100], внутригодовые ряды [58, 60, 90], мультитременные ряды [65, 66, 76, 78]. При индикации разных почв и их пространственной неоднородности используют как вегетационные индексы, отражающие чаще всего растительный покров [76, 78, 87, 90, 91, 101], так и открытую поверхность почвы [13, 14, 17, 18, 36–38].

Наземные методы трудоемки [26, 44]. Методы моделирования дают потенциальную, а не реальную деградацию почвенного покрова [17]. Вегетационные индексы при детектировании различий почв следует относить к косвенным методам. В связи с трудоемкостью наземных методов, недостатками методов моделирования и косвенных методов, интерес представляют методы обработки ДДЗ по спектральным характеристикам открытой поверхности почвы. Выделение открытой поверхности почвы возможно на ДДЗ в парадигме спектральной окрестности линии почвы (СОЛП). Теория СОЛП изложена в серии работ 2016–2018 гг. [13, 14, 18, 36–38]. Она предполагает возможность выявления пространственной неоднородности почвенного покрова на основе больших спутниковых данных [68, 73], но без использования индикационной ботаники.

Картографирование потенциальной эрозии почв обычно выполняют на основе разных моделей, учитывающих влияние тех или иных факторов на интенсивность смыва, для которых имеются пространственно-распределенные данные. Используют цифровые модели рельефа [15, 22, 64], их изменение во времени [67, 81, 86], а также сопряженные данные разных индексов спектральных характеристик ДДЗ и цифровой модели рельефа [16, 34, 39–41, 53, 99]. В основу многих работ положена модель RUSLE [88], оценивая ее параметры на основе различных наземных и дистанционных материалов [8, 12, 55, 61, 63, 69, 71, 84, 96, 102, 103]. Часто применяют модель WATEM/SEDEM [8, 12, 42, 48, 56, 57, 70, 102, 103], реже – локальные модели гидрологического цикла, оценивающие потери почвы во время ливней и снеготаяния [8, 102, 103]. В ряде работ используют особые подходы к оценке эрозионных процессов: модель комплексной оценки экосистемных сервисов и компромиссов (integrated valuation of ecosystem services and trade-offs (InVEST) model) [79], содержание органического углерода и водоустойчивых агрегатов в почве [59], статистические модели связи климатических индексов засухи и показателей эрозии почв [83], распределенную модель накопления твердых осадков (Sediment Delivery Distributed model – SEDD) в крупном бассейне с учетом источников сноса материала [62]. В специальном обзоре обсуждаются элементы связности и меры по смягчению последствий в 14 моделях эрозии национального, регионального, бассейнового и локального масштабов, используемых в европейских

государствах, а также обращают внимание на необходимость верификации моделей на основе полевых данных [95]. В ряде работ производят калибровку или верификацию моделей, основываясь на оценке скорости почвенной эрозии по измерению содержания ^{137}Cs [57, 70, 102, 103], или методом магнитного трассера [2, 3].

Общие закономерности проявления эрозионно-аккумулятивных процессов в почвенном покрове изложены в работах Соболева, Заславского, Сурмача, Швебса, Каштанова [9, 24, 43, 45, 54]. География современного развития эрозии и дефляции на территории России представлена в работах [20, 21].

Пространственную неоднородность почвенного покрова исследуют на основе теории структуры почвенного покрова (СПП) [5, 25, 49].

Сотрудниками Омского государственного аграрного университета под руководством Я.Р. Рейнгарда выполнена серия работ по исследованию СПП Омской области, где использованы 14 ключевых участков с почвенным картографированием в масштабе 1 : 25 000 [1, 6, 29–32]. В южно-таежной зоне с подзолистыми, глеево-подзолистыми, серыми лесными глеевыми, луговыми, болотными и антропогенно-измененными почвами процессы эрозии и дефляции способствовали увеличению максимального индекса дробности и коэффициента контрастности почвенных комбинаций, уменьшению количества монолитных элементарных почвенных ареалов, увеличению линейных ареалов [1, 30]. Для степной зоны отмечается преимущественное развитие эрозии и/или дефляции в черноземах на гривах с суммарной долей подверженных этим процессам почв, превышающей 50% в изученных СПП [6, 31]. Сравнение показателей СПП участков природных почв с участками, на которых проявляется эрозия, показало уменьшение средних и максимальных размеров ЭПА, увеличение степени дробности СПП, доли вытянутых ЭПА, коэффициента контрастности ЭПА под влиянием эрозии во всех зонах, особенно сильно на полого-волнистых равнинах степи [29, 32].

В Башкортостане ведущим фактором в формировании микроструктур почвенного покрова являются эрозионно-аккумулятивные и суффозионные процессы, интенсивность которых в пространстве оценивали по мощности гумусовых горизонтов и глубине вскипания [7].

На Курской сельскохозяйственной станции установлено сложное топографо-флювиальное водно-эрозионное сочетание черноземов типичных, выщелоченных, перерывных, разной степени эродированности и гумусированности на выпуклых и ровных склонах и лугово-черноземных намытых почвах в ложбинах [47]. Автором в пределах межбалочного водораздела выделено

5 генетических типов микрокомбинаций почвенного покрова в виде комплексов и пятнистостей, два из которых непосредственно обусловлены эрозионно-аккумулятивными процессами [47].

Для территории Прохоровского района Белгородской области были составлены отдельно цифровые карты почвенных комбинаций¹ и карты степени эродированности почв на основе двух независимых моделей и 639 почвенных профилей (в среднем 1 разрез на 110 га) полевого обследования 2016–2017 гг. [8]. Совмещение информации о почвенных комбинациях и степени эродированности почв получено на основе генерализации карты почвенных комбинаций до показа только доминантной почвы в контуре. При этом авторы отмечают высокую информативность полученных цифровых карт эродированности почв. В другой работе сделан сравнительный анализ цифровых способов построения почвенных карт этого района, отражающих участие эродированных почв [42].

На основе детальных исследований латеральной миграции твердофазного вещества почв методом магнитного трассера и крупномасштабного почвенного картографирования малого водосбора в бассейне р. Локна (Тульская область) выделено 7 зон рассеяния и 9 зон аккумуляции твердофазного вещества в почвенном покрове [3]. Зоны рассеяния расположены на водоразделе, длинных пологих, выпуклых или крутых склонах и представлены черноземами глинисто-иллювиальными оподзоленными и их смытыми вариантами, диагностируемыми как разные агрозоны темные. Зоны аккумуляции помимо днища балки со стратоземами и вогнутых поверхностей со стратифицированными почвами встречаются на склонах, образуя волнообразную структуру смены зон аккумуляции и рассеяния [3].

Цель работы – представить результаты наземного исследования эрозионно-аккумулятивной СПП ключевого участка и провести оценку информативности мультिवременных ДДЗ для ее выявления и картографирования в зоне распространения темно-каштановых почв.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Ключевой участок расположен на территории ООО “Красная Звезда” Обливского района Ростовской области в 5 км на юго-запад от хутора Сиволобов (рис. 1).

Территория входит в Миллерово-Морозовскую наклонную равнину в пределах Доно-Донецкой холмисто-грядовой равнины [28]. Равнина пред-

ставляет собой увалисто-волнистую равнину с отметками 100–180 м, расчлененную балками, оврагами, на водоразделах слабодренированную, местами бессточную, с глубоким залеганием грунтовых вод – более 10 м. Равнина покрыта мощной толщей желто-бурых лёссовидных суглинков, на востоке – красно-бурых суглинков и глин. Локально породы засолены с 1.5–2 м. С запада на восток в почвенном покрове происходит смена южных черноземов на темно-каштановые почвы. Последние являются доминирующими почвами на исследуемом ключевом участке.

Поле размером 2 × 2 км, в пределах которого был выбран ключевой участок, пересекает гряда, возвышающаяся на 23 м с южной и на 10 м с северной стороны. Гряда простирается с востока на запад. Водораздельное пространство слабовыпуклое шириной около 100 м. Южный склон гряды более крутой с общим средним уклоном 0.036 (2.06°). В наиболее крутой части со средним уклоном 0.08 (4.57°) и шириной около 200 м он осложнен серией эрозионных ложбин, расположенных вдоль склона перпендикулярно относительно линии водораздела и параллельно между собой. Северный склон имеет общий средний уклон 0.019 (1.09°). Он рассечен древовидными ложбинами, верховья которых закладываются на узком относительно крутом участке склона (уклон до 0.06 или 3.43°). Сами ложбины расположены ниже, преимущественно на пологой части с уклоном около 0.01 (0.57°). Ключевой участок имеет площадь 51 га. Уклоны поверхности получены на основе нивелирного хода, пересекающего гряду с севера на юг.

При обследовании в июле 2022 г. было сделано 39 точек опробования, в виде почвенных разрезов с дополнительным бурением до глубины 2–3 м. Положение почвенных разрезов планировалось в камеральных условиях до начала полевых работ на основе трех типов дистанционных материалов: (1) рельефа по SRTM; (2) космического снимка высокого разрешения, на котором ясно отражена сеть ложбин; (3) карты коэффициента *C* мультिवременной линии почв. Выход в поле на точку сделан с помощью приемника GPS по географическим координатам, полученным в ГИС в камеральный период. Разрезы заложили на 9 гипсометрических уровнях в виде трансект поперек общего склона, характеризуя ареалы ложбин и территории между ними по снимку высокого разрешения и пикселям с разными значениями коэффициента *C* мультिवременной линии почв. Уровни 1–4 расположены на склоне северной экспозиции, уровень 5 – водораздел гряды, уровни 6–9 находятся на склоне южной экспозиции.

Расчет коэффициента *C* мультिवременной линии почвы базируется на теории спектральной окрестности линии почв (СОЛП – spectral neighborhood of the soil line (SNSL)) [37, 38].

¹ Авторы [8] предпочли термин “почвенные ассоциации” вместо привычного термина “почвенные комбинации”, предложенного Фридландом [49] и широко используемого в России при исследовании структуры почвенного покрова.

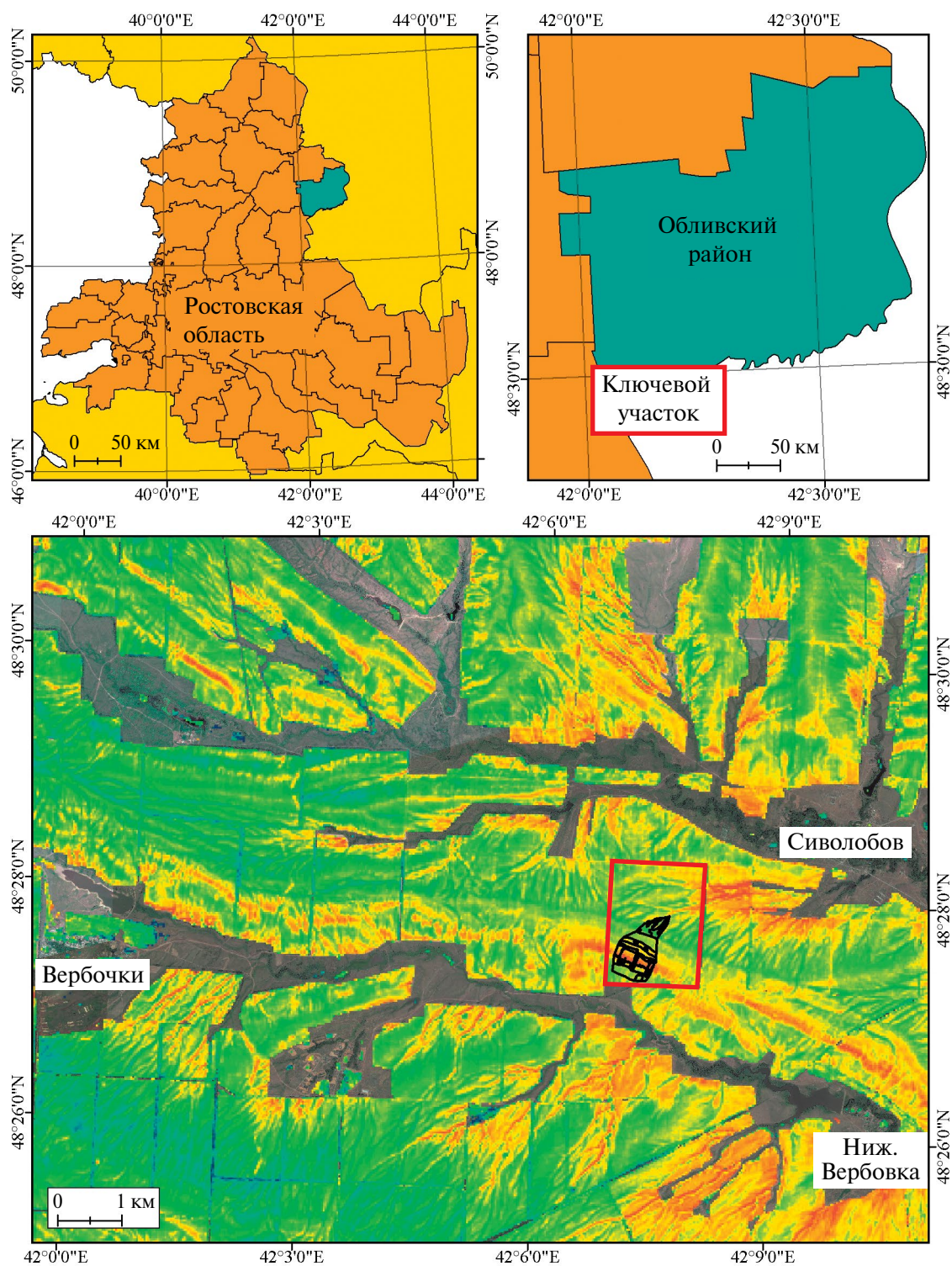


Рис. 1. Фактическое расположение ключевого участка в Обливском районе Ростовской области. Внизу карта коэффициента C мультитременной линии почвы.

Характеристики открытой поверхности почвы (ОПП) группируются в спектральном пространстве RED-NIR в особую эллиптическую область, которую нельзя выделить с использованием теории и практики вегетационных индексов [13]. При выделении характеристик ОПП в СОЛП на всех пригодных для решения этой задачи снимках Landsat 4, 5, 7, 8, 9 появляется возможность построения в спектральной плоскости для каждого пикселя Landsat (30×30 м) области распределения значений RED-NIR во временном интервале с 1984 г. по настоящее время. Для этого используют десятки возможных значений на сотнях кадров ДДЗ за 37 лет для каждого пикселя. Область распределения во всем временном интервале описывается эллипсом так же, как ОПП отдельного снимка [92, 93]. Большая ось эллипса является мультिवременной линией почвы, а точнее отрезком в спектральной мультिवременной плоскости. Центр эллипса (середина отрезка мультिवременной линии почвы) хорошо отражает взаиморасположение эллипсов мультिवременных значений ОПП различных почв [14]. В данной работе использована одна из характеристик эллипса мультिवременных значений ОПП — удаленность центра эллипса от начала координат спектральной плоскости RED-NIR. Удаленность центра эллипса введена как коэффициент *C* мультिवременной линии почвы. На рис. 1 приведена карта значений коэффициента *C* на территории Морозовского и Обливского районов Ростовской области.

Образцы из 15 разрезов отбирали по всему профилю почв и пород (около 200 шт.) для анализа солевых характеристик. Дополнительно в 16 разрезах образцы брали только из пахотных горизонтов 0–20 см для агрохимической характеристики.

Диагностику почв выполняли по трем классификациям: СССР (далее К-1977) [10], России (далее РК-2004(22)) [11, 27, 50, 51], международной (далее WRB-2015) [75].

Содержание гумуса определяли методом Тюрина, карбонатов — методикой Козловского [33] в Испытательном лабораторном центре Федерального исследовательского центра “Почвенный институт им. В.В. Докучаева”.

Для оценки засоленности почвы был использован потенциометрический метод. Измерение иономером Экотест-2000, ионоселективными электродами ЭКОМ-Na, ЭКОМ-Ca, ЭКОМ-Cl в паре с вспомогательным в почвенных пастах с влажностью 45–50% [33]. Степень засоления оценивали по активности Na по следующей шкале: <15–20 ммоль/л (в зависимости от химизма) — незасоленный горизонт, 15(20)–50 ммоль/л — слабая степень, 50–150 ммоль/л — средняя степень, 150–300 — сильная степень, >300 ммоль/л — очень сильная степень засоления [24].

Почвенные карты участка с отражением структуры почвенного покрова строили в ручном варианте в QGIS на основе информации о почвах в 39 разрезах, изображения общедоступного космического снимка высокого разрешения и рельефа (рис. 2, табл.1). Растровый слой значений коэффициента *C* мультिवременной линии почв для этого не использовали, чтобы была возможность оценить его информативность для картографирования почв.

Статистическую обработку данных выполняли в MS Excel.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Структура почвенного покрова участка. На ключевом участке фоновыми являются темно-каштановые пахотные тяжелосуглинистые и глинистые почвы (агротемно-каштановые по РК-2004(22) или Haplic Kastanozems (Aric, Loamic) по WRB). На наиболее крутой части южного склона развиты средне- и сильноосмытые почвы — агроземы аккумулятивно-карбонатные. В шлейфовом поясе южного склона встречаются очень сильно намытые почвы — стратоземы темногомусированные. Разнообразие компонентов почвенного покрова определяется комбинацией следующих диагностических признаков: (1) солонцеватость (квалификаторы WRB — Luvisc, Protosodic); (2) темная языковатость, обусловленная засыпкой материала темногомусового горизонта в периодически открывающиеся трещины (Tonguic); (3) слитизированность (Vertic); (4) разный карбонатный профиль по глубине вскипания от HCl (в WRB нет соответствующих квалификаторов); (5) квазиглееватость в нижней части профиля; (6) наличие гипсовых новообразований — гипсодержащие; (7) наличие карбонатно-гумусированного намытого материала — стратифицированность (Novic); (8) глинистая иллювирированность, обусловленная процессами выщелачивания, — признак глинисто-иллювирированный (i) и горизонт глинисто-иллювиальный BI (Luvisc); (9) засоленность в нижней части профиля — глубокосолончаковатые (Bathyprotosalic). Обратим внимание, что до сих пор в зоне распространения темно-каштановых почв слитизированные подпиты не были выявлены [52].

Структура почвенного покрова представлена сочетанием разных вариаций малококонтрастных почв на выпуклых и вогнутых поверхностях в пределах более крупной формы рельефа, а также однородных в классификационном отношении элементарных почвенных ареалов. Расположение контуров почвенной карты обусловлено мезорельефом и почвообразующими породами. Вытянутая в субширотном направлении гряда делит ключевой участок на три сильно отличающиеся части: (1) узкое водораздельное пространство посередине участка, (2) южный (общий средний уклон 0.036° или 2.06°)

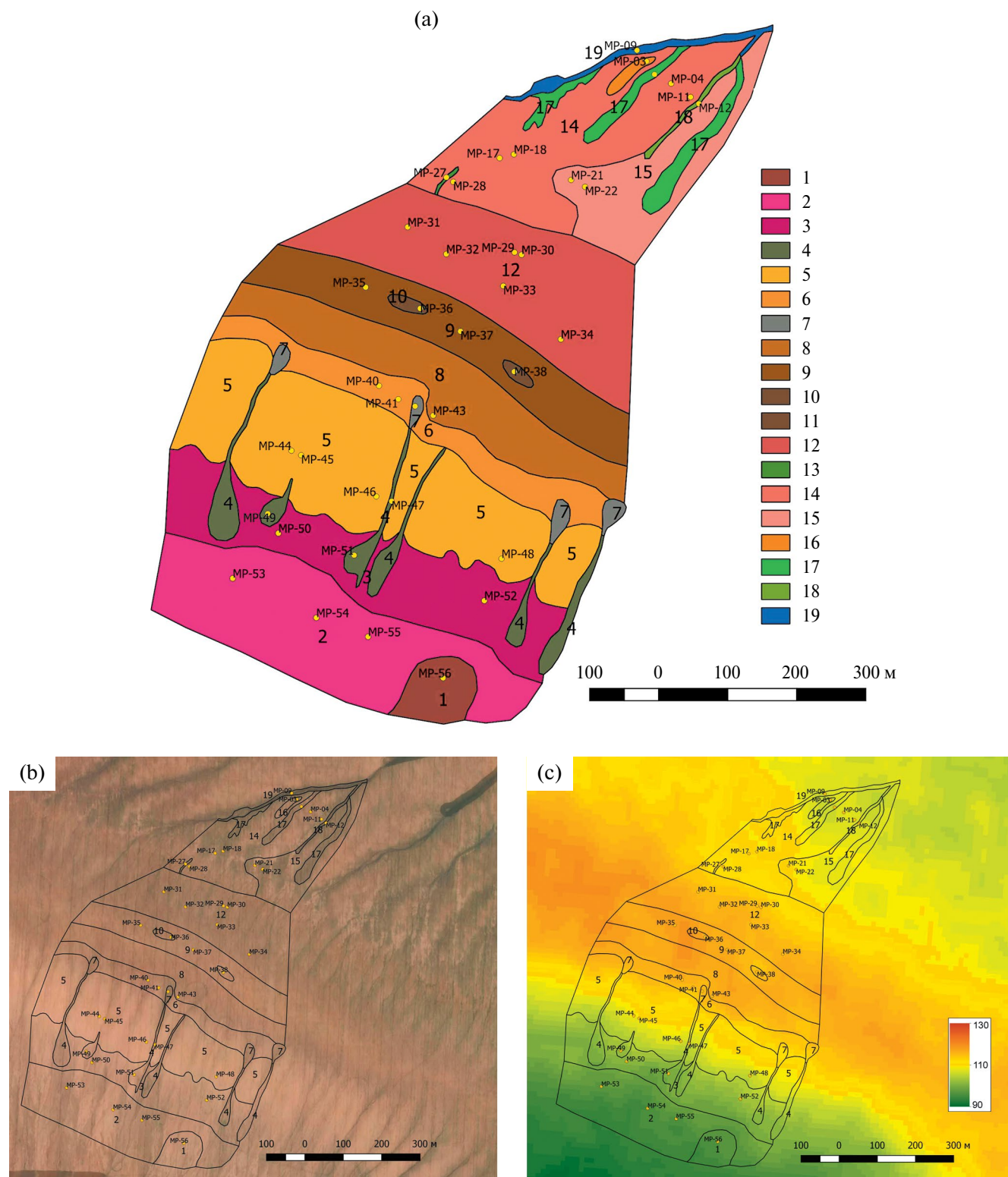


Рис. 2. Эрозионно-аккумулятивная структура почвенного покрова ключевого участка возле хутора Сиволобов: (а) – почвенная карта; (б) – контурная часть почвенной карты на фоне космического снимка высокого разрешения из открытых источников; (с) – на фоне рельефа. Цифры 1–19 – номера почвенных комбинаций (см. табл. 1); точки с подписями MP-03...MP-56 – почвенные разрезы.

Таблица 1. Легенда почвенной карты ключевого участка с эрозионно-аккумулятивной структурой почвенного покрова, юго-западнее хутора Си-волобов, Обливский район, Ростовская область

№ на карте	Почвы	Гранулометрический состав	Породы	Геоморфологическое положение	Вариант профиля почв	Площадь	
						га	%
1	Агротемно-каштановые темноязычковые сегрегационные глинисто-иллювирированные высоко-вскипающие глубокогогиссодержающие глубококватригилеоватые тяжелоуглинистые почвы	Тяжелосуглинистые	Желто-бурые суглинки	Пологий склон ниже шлейфа южного склона	PU–AB(ca)–BMKca,yu–BCAnc,yu–BCAnc,i–BCca,i–Cca,cs,q	0.89	1.7
2	Вариация агротемно-каштановых карбонатно-гумусово-стратифицированных темноязычковых тяжелоуглинистых почв, отличающихся карбонатным профилем: (а) профильно-карбонатных со вскипанием во всех горизонтах, (б) с сохранившимися горизонтами АВ и ВМКуч, не имеющими вскипания от НС1, между пахотным горизонтом, содержащим намытый карбонатно-гумусовый материал, и исходными природными карбонатными горизонтами средней и нижней частей профиля	Тяжелосуглинистые	Желто-бурые суглинки	Пологий склон ниже шлейфа южного склона	(а) PU1ca,rh–PU2ca,rh–PU3(ca)–AB(ca)–BMKca,yu–BCAnc; (б) PU1ca,rh–PU2ca,rh–AB–BMKyu–BMKca,yu–BCAnc,yu–BCAnc	6.56	12.8
3	Вариация агротемно-каштановых карбонатно-гумусово-стратифицированных тяжелоуглинистых почв, имеющих не вскипающий гор. АУ ниже карбонатного пахотного и отличающихся горизонтами средней части профиля, на шлейфовом поясе южного склона: (а) фоновые почвы на ровных и выпуклых в поперечном направлении элементах рельефа с наличием гор. ВМК; (б) почвы в ложбинах с отсутствием гор. ВМК	Тяжелосуглинистые	Желто-бурые суглинки	Шлейфовый пояс южного склона	(а) PU1ca,rh–PU2ca,rh–PU3ca,rh–AUpa–ABca–BMKca–BCAnc–BCca–BCca,cs; (б) PU1ca,rh–PU2ca,rh–AU–ABca–Vca,yu–BCAnc–BCca	5.04	9.9
4	Вариация агростратоземов карбонатно-темногумусированных на погребенных почвах с разным профилем	Тяжелосуглинистые	Желто-бурые суглинки	Ложбины крутой части и шлейфового пояса южного склона	(а) PU1ca,rh–PU2ca,rh–RAu,ca–RAu,ca,nc–BCAnc; (б) PU1ca,rh–PU2ca,rh–RAu,ca–RAu,ca,nc–ABca–BCAnc–BCca,q–Cca,q; (в) PU1ca,rh–PU2ca,rh–RAu,ca–ABca–BCAnc	1.5	2.9
5	Вариация агроземов аккумулятивно-карбонатных (силыносмытых почв) с разными профилями: (а) поверхностно-вскипающих солонцеватых гипс-содержащих глубокогогиссодержающих на выпуклых частях склона; (б) поверхностно-вскипающих темноязычковых на слабывыпуклых и ровных частях склона; (в) высоковскипающих глубокогогисс-содержащих в днищах слабывыраженных ложбин	Тяжелосуглинистые	Желто-бурые суглинки	Крутая часть южного склона, включающая различные элементы: (а) выпуклые; (б) слабывыпуклые и ровные; (в) днища слабывыраженных ложбин	(а) Pca–BCAnc,sn–BCca,cs; (б) P1ca–P2ca–Vca,yu–BCAnc; (в) P1–P2–P3–BCAnc–BCca–Cca,cs	9.15	17.9

Продолжение табл. 1

№ на карте	Почвы	Гранулометрический состав	Породы	Геоморфологическое положение	Вариант профиля почв	Площадь
6	Вариация агроземов темных аккумулятивно-сегрегационно-карбонатных профильно-вскипаяющих глубокогипсодержащих глубокосолончаковых с варьирующей мощностью гор. ВСАnc и глубиной верхней границы появления гипса	Глинистые	Бурые глины	Верхняя часть крутого южного склона	PU1ca—PU2ca—BCAnc—BCca—Cca,cs	2.56
7	Агрогемногумусовые карбонатно-гумусово-стратифицированные слитизированные сегрегационно-карбонатные поверхностно-вскипаяющие почвы	Глинистые	Бурые глины	Вогнутые расширения верховий (амфи-театры) ложбин южного склона	PUca,rh—AU—AUv—ABca,v—ABca,nc,v—BCAnc—BCca—Cca,mc	0.37
8	Вариация агрогемно-каштановых солонцеватых сегрегационных профильно-вскипаяющих глубоко ипсодержащих почв разного гранулометрического состава	Тяжелосуглинистые и глинистые	Желто-бурые суглинки и бурые глины	Приводораздельная пологая часть южного склона	PUca—BMKca,sn—BCAnc,sn—BCAnc—BCca—Cca,cs—Cca	4.2
9	Вариация агрогемно-каштановых солонцеватых темнотычиловатых сегрегационных профильно-вскипаяющих глубокогипсодержащих глубококвализирующих глинистых почв с отсутствием и наличием недиагностического горизонта Vca,sn,yu	Глинистые	Бурые глины различной мощности, подстилаемые с 100—180 см тяжелыми суглинками	Узкое водораздельное пространство вытянутой гряды	(a) PUca—BMKca,sn,yu—BCAnc,sn,yu—BCca,q—2Cca—2Cca,cs; (б) PUca—BMKca,sn,yu—Vca,sn,yu—BCAnc,yu—BCca—Cca,q—Cca,q,cs	4.11
10	Агрогемно-каштановые солонцеватые темнотычиловатые сегрегационные высоко-вскипаяющие глубокогипсодержащие глубококвализирующие глубокосолончаковые почвы	Глинистые	Бурые глины, подстилаемые с 120 см тяжелыми суглинками	Узкое водораздельное пространство вытянутой гряды	PU1—PU2(ca),pb—BMKca,sn,yu—BCAca,sn,yu—BCca,sn—BCca—2Cca—2Cca,cs—2Cca,q	0.1
11	Агрогемно-каштановые солонцеватые темнотычиловатые квализирующие сегрегационные высоко-вскипаяющие глубокогипсодержащие глубокосолончаковые почвы	Глинистые	Бурые глины, подстилаемые с 180 см тяжелыми суглинками	Узкое водораздельное пространство вытянутой гряды	PU—BMKca,sn,yu—BCAnc,sn,yu—BCca,sn,q—BCca,q—Cca,q,cs—2Cca,q—2Cca,q,cs	0.09
12	Вариация агрогемно-каштановых темнотычиловатых сегрегационных поверхностно-вскипаяющих глубокогипсодержащих глубокосолончаковых почв выпуклых частей склона с квализирующими и/или слитизированными подтипами в слабовыраженных широких ложбинах	Глинистые	Бурые глины	Приводораздельная пологая и покатая части северного склона, расчлененная слабовыраженными широкими мелкими ложбинами	(a) PUca—BMKca,yu—BCAnc,yu—BCAnc—BCca—Cca,cs; (б) PUca—BMKca,yu—BCAnc—BCca—BCca,q—Cca,q—Cca,q,cs; (в) PU1ca—PU2ca,pb—BMKca,yu—BCAnc,yu—BCAnc,yu,v—BCca—BCca,q—Cca,q—2Cca,q—2Cca,q—2Cca,q,cs	7.01
						13.7

Окончание табл. 1

№ на карте	Почвы	Гранулометрический состав	Породы	Геоморфологическое положение	Вариант профиля почв	Площадь	
13	Агротемно-каштановые карбонатно-гумусово-стратифицированные солонцеватые сегрегационные поверхностно-вскипающие почвы	Глинистые	Бурые глины	Днище мелкой узкой ложбины в средней части северного склона	PU1ca, rh – PU2 – BMKsn – BMKsn, ca – BCanc, sn	0.03	0.1
14	Вариация агротемно-каштановых солонцеватых сегрегационных почв с варьированием глубины вскипания на вогнутых и выпуклых участках, наличием или отсутствием темных кутан и признаков квазиглееватости глубже 100 см	Глинистые	Бурые глины	Пологая нижняя часть северного склона, расчлененная дендровидной сетью ложбин	(а) PU1el – PU2 – BMKsn – BMKsn, ca – BCanc – BCca – CSca; (б) PU – BMKsn – BMKsn, ca – Bca, sn – BCanc – BCanc, q – BCca, q; (в) PU – BMKsn, iu – BMKca, sn, iu – BMKsn, ca – BCanc – BCca; (r) PU – BMKsn, iu – BCanc PU – BMKsn, yu – BMKsn, yu, ca – BCanc, yu, sn – BCanc – BCca – CSca – CSca, cs	5.12	10
15	Агротемно-каштановые солонцеватые темноязыковатые сегрегационные срединно-вскипающие почвы	Тяжелосуглинистые	Желто-бурые суглинки	Пологая нижняя часть северного склона, расчлененная дендровидной сетью ложбин	PU1 – PU2 – PU3pb, (ca) – Bca – BCanc – BCca – BCca, q	0.12	0.2
16	Агроземы темные аккумулятивно-сегрегационно-карбонатные квазиглееватые высоковскипающие	Глинистые	Бурые глины	Выпуклая поверхность на пологой нижней части северного склона между ложбинами	PU1 – PU2 – PU3pb – BMK – Bca, i – BCanc, i – BCanc – BCca	0.96	1.9
17	Вариация агротемно-каштановых глинисто-иллювирированных сегрегационных высоковскипающих почв разного гранулометрического состава	Глинистые и тяжело-суглинистые	Бурые глины и желто-бурые суглинки	Днища широких мелких ложбин на пологой низкой части северного склона	PU – BMK – Bca, yu – BCanc, yu – BCanc – 2BCca	0.13	0.3
18	Агротемно-каштановые темноязыковатые сегрегационные срединно-вскипающие почвы	Глинистые	Бурые глины, подстилаемые со 100 см тяжелыми суглинками	Днище узкой ложбины на пологой низкой части северного склона	PU1 – PU2 – PU3pb – BMKi – BI – Bca, i – BCanc, mc – BCanc – BCca	0.42	0.8
19	Агротемно-каштановые глинисто-иллювиальные мицелярно-сегрегационно-карбонатные срединно-вскипающие почвы	Глинистые	Бурые глины	Днище глубокой узкой ложбины на пологой низкой части северного склона		51.08	99.8
ВСЕГО							

и (3) северный (общий средний уклон 0.019° или 1.09°) склоны (рис. 2с). Исследуемая СПП по классификации, предложенной Фридландом [49], входит в семейство почвенного покрова, образованное сочетаниями-вариациями автоморфных, преимущественно нейтральных почв.

Водораздельное пространство на ключевом участке, прилегающая к нему приводораздельная пологая часть южного склона и большая часть северного склона представлены плащом лёссовидных бурых набухающих глин мощностью от 1.0 до 2.5–3.0 м. Бурые глины подстилаются мощной толщей желто-бурых лёссовидных тяжелых суглинков, которые выходят на поверхность и служат почвообразующей породой почти на всем южном склоне и в северо-восточной части ключевого участка на северном склоне. Исходя из высоты контакта бурых глин и желто-бурых суглинков, следует допустить исходное наклонное залегание этих пород в направлении с юго-востока на северо-запад. В результате почвы, входящие в контуры 6–14, 16–19, являются глинистыми, а остальные — тяжелосуглинистыми.

Различие в почвообразующих породах предопределило формирование мезорельефа и особенности проявления эрозионных процессов.

На узком водораздельном пространстве сформировались агротемно-каштановые солонцеватые темнотычиловатые глубокогипсодержащие квазиглееватые и глубококвазиглееватые глубокосолончаковатые глинистые почвы с разной глубиной вскипания от НС1 (контуры 9–11, рис. 2, табл. 1). На общем фоне профильно-вскипающих почв, содержащих карбонаты по всему профилю (контур 9), сохранились небольшие ареалы высоко-вскипающих почв, в которых пахотный горизонт PU не имеет вскипания совсем, или встречается локальное вскипание в его нижней части по припаханным фрагментам нижележащих карбонатных горизонтов (контуры 10, 11). Такое соотношение почв позволяет утверждать, что большая часть водораздельного пространства подверглась комплексному удалению материала с поверхности за счет водной эрозии, дефляции и механического перемещения плугом вниз по склону.

В результате эрозии исходные гумусовые горизонты, не содержащие карбонатов, частично удалены, а к их оставшейся части припаханы нижележащие карбонатные горизонты. После многократного перемешивания пахотного горизонта произошла его гомогенизация и возникновение сплошного вскипания от НС1. Некоторые ареалы были затронуты эрозионными процессами существенно в меньшей степени, что способствовало сохранению в них пахотного невоскипающего горизонта. При этом в пределах водораздельного пространства исходный гумусовый профиль, включавший

темногумусовый AU и переходный AB горизонты, полностью преобразован в агротемногумусовый (пахотный) горизонт PU мощностью 20–28 см, что в 1.5–2 раза меньше мощности гумусового профиля темно-каштановых почв, не подверженных эрозии. По этой причине часто используемая система определения степени эродированности по изменению мощности гумусового профиля на склоне, по сравнению с таковой на водоразделе [8, 29, 42, 45], не применима к данному ключевому участку.

На южном склоне гряды образовались эрозионно-аккумулятивная структура почвенного покрова в виде сложного сочетания-вариации, включающего несколько гипсометрических ярусов смытых и намытых почв, расчлененных в поперечном направлении узкими ложбинами.

Самый верхний ярус представлен пологим приводораздельным склоном (уклон 0.006 – 0.010 или 0.34° – 0.57°) с вариацией агротемно-каштановых солонцеватых сегрегационных поверхностно-вскипающих глубоко гипсодержащих глубокосолончаковатых тяжелосуглинистых и глинистых почв. От фоновых почв водораздельного пространства они отличаются отсутствием темных языков засыпанного в трещины материала (контур 8, рис. 2). В узкой полосе с увеличивающимся уклоном от 0.010 (0.57°) до 0.030 (1.72°) перед крутой частью южного склона закладываются верховья ложбин, образуя поперечную слабую волнистость поверхности. На выпуклых и слабоогнутых позициях в пределах этого яруса развиты глубокосолончаковатые почвы без ксерометаморфического горизонта ВМК — карбонатный пахотный горизонт граничит непосредственно с аккумулятивно-карбонатным горизонтом с белоглазкой ВСАпс (контур 6, рис. 2, 3). Эти почвы можно считать среднесмытыми, а по строению почвенного профиля они относятся к другому типу — агроземам аккумулятивно-карбонатным, которые содержат карбонаты по всему профилю, начиная с дневной поверхности.

Верховья наиболее крупных ложбин представляют собой вогнутые расширения в виде амфитеатра, сужающиеся к днищам ложбин в области заметного перегиба от приводораздельной пологой к средней крутой части общего южного склона. В таких вогнутых расширениях верховий ложбин расположены агротемногумусовые карбонатно-гумусово-стратифицированные слитизированные сегрегационно-карбонатные сложно-вскипающие глинистые незасоленные почвы (луговато-каштановые выщелоченные слитые намытые пахотные по K-1977 или Vertic Kastanozems (Aric, Loamic, Loaminovic) по WRB) (контуры 7, рис. 2). Мощность вскипающего с поверхности пахотного горизонта PUca, rh, содержащего поступивший карбонатно-гумусированный материал, составляет 17 см. Под ним сохранился уплотненный темногумусовый горизонт AU, не содержащий карбонатов.

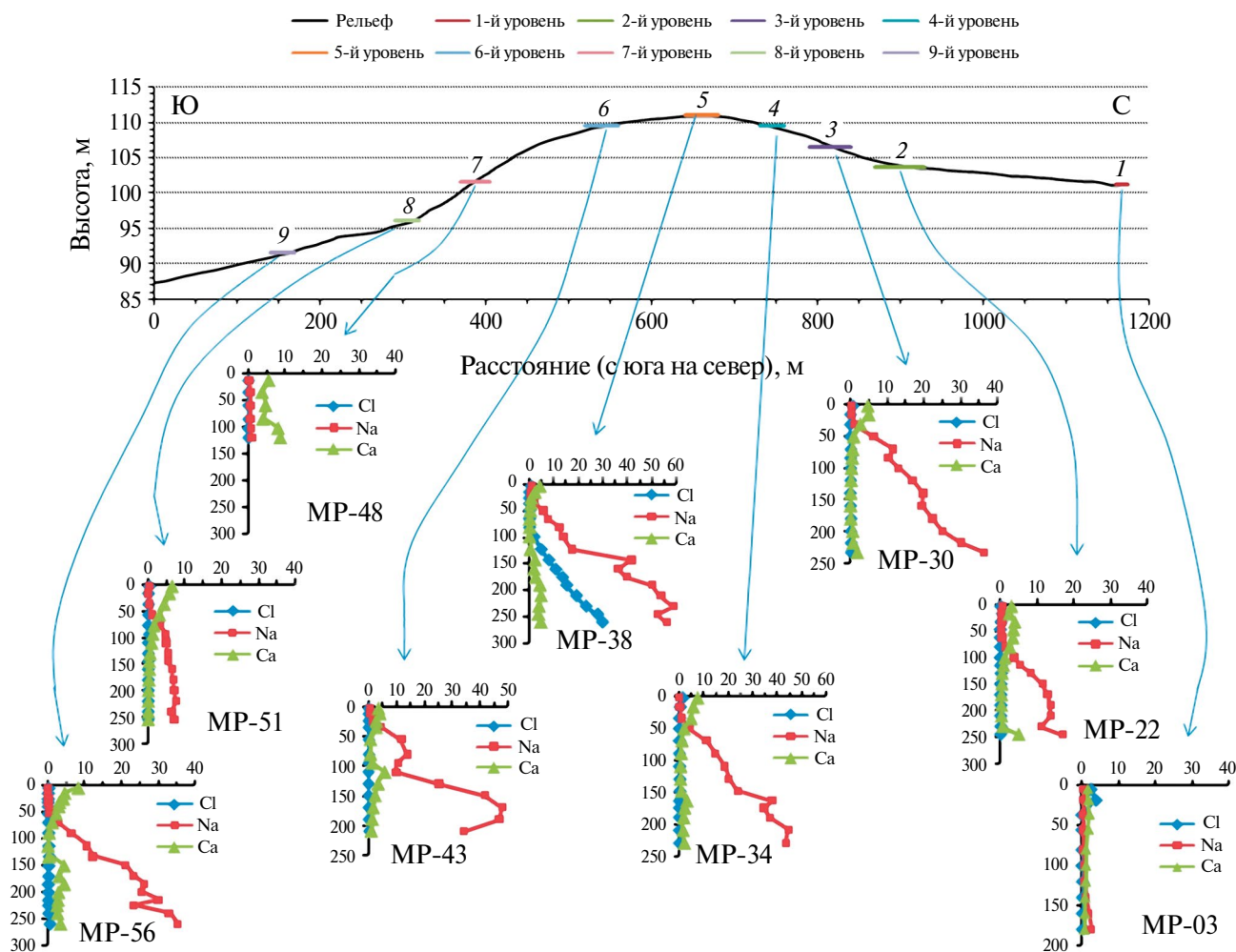


Рис. 3. Распределение солей в почвах и породах вдоль транsekты, пересекающей гряды в поперечном направлении. Верхний график – гипсометрический профиль транsekты: 1–9 – нумерация гипсометрических уровней заложения почвенных разрезов. Нижние графики – профили активностей ионов Na^+ , Ca^{2+} , Cl^- , измеренные в пастах с влажностью 50% мас.

Вторая граница вскипания от HCl появляется с 82 см. Это означает, что до начала развития эрозийных процессов почва имела пониженное вскипание за счет сосредоточения поверхностного стока в амфитеатре и промывания верхней части почвенного профиля до глубины около 65 см, глубже формировался природный карбонатный профиль с аккумуляциями в виде белоглазки. Поступление карбонатного материала на поверхность в амфитеатре, очевидно, после распашки территории привело к образованию синтетического карбонатного профиля с невскипаящими горизонтами внутри. В нижней части AU и в переходном горизонте АВса на глубине от 35 до 130 см развиты поверхности скольжения (сликенсаиды) размером 3–15 см, разной азимутальной ориентации и углом наклона от 10° до 30° к горизонтالي, а также редкие клиновидные агрегаты на глубине 70–120 см.

Они диагностируют признак v – слитизированный в РК-2004(22) и квалификатор Vertic в WRB. Полученные сведения расширяют и дополняют представления о распространении слитоземов и слитизированных почв на территории России [52].

На наиболее крутой части южного склона (уклон от 0.050 (2.86°) до 0.092 (5.26°), в среднем 0.080 (4.57°)) сформировалось несколько ареалов вариации агроземов аккумулятивно-карбонатных (сильносмывных почв) с разным строением профиля (контуры 5, рис. 2): (а) профильно-вскипаяющих солонцеватых гипсодержащих почв $\text{Pca-BCAnc,sn-BCsa,sn-Csa,cs}$ на выпуклых в поперечном направлении участках склона; (б) профильно-вскипаяющих темнотыковых почв $\text{Pca-Vsa,yu-BCAnc-BCsa-Csa,cs}$ на слабовыпуклых и ровных в поперечном направлении участках склона; (в) высоковскипаяющих (с глубины около 30 см)

глубокогипсодержащих почв в днищах слабовыраженных ложбин, пересекающих внутреннюю часть ареалов вариации субпараллельно с интервалом от 37 до 75 м и глубиной вреза не более 0.4–0.6 м. Указанные вариации агроземов расположены на склоне между относительно более сильно врезанными (до 1 м) ложбинами, в которых к настоящему моменту накопился намытый материал мощностью более 40 см, что соответствует идентификации агростратоземов карбонатно-темногумусированных. Расположение сильно смытых почв на крутых склонах хорошо известно в литературе [1–3, 5–9, 15, 16, 19–24, 29, 42–46].

Ниже крутой части южный склон приобретает меньший уклон от 0.033 (1.89°) до 0.014 (0.80°), в среднем 0.028 (1.60°), образуя своеобразную наклонную ступень. Эту часть склона назвали “шлейфовым поясом”. Она отличается чередованием двух типов ареалов намытых почв: (1) агростратоземов карбонатно-темногумусированных профильно-вскипающих на погребенных, в разной степени смытых почвах (контуры 4, рис. 2); и (2) вариации агротемно-каштановых карбонатно-гумусово-стратифицированных сложновскипающих тяжелосуглинистых почв с сохранившимся горизонтом AU без вскипания под намытым материалом (контуры 3, рис. 2, табл. 1).

Агростратоземы имеют карбонаты в намытой и погребенной частях по всему профилю. Их ареалы, похожие на каплю с длинным хвостиком, начинающимся на крутой части склона, расположены в днищах крупных ложбин и прилегающих к ним позициям шлейфового пояса (контуры 4, рис. 2). Поскольку весь склон является пашней, верхняя часть намытого материала подвергается вспашке, образуя агротемногумусовый вскипающий с поверхности горизонт PUca,rh, а нижняя часть превращается в стратифицированный гумусовый горизонт RAu,ca. Намытый материал накопился на погребенных почвах: сильно смытых до аккумулятивно-карбонатного горизонта BCanc или среднесмытых до гор. ABca бывших темно-каштановых почв. В результате агростратоземы карбонатно-темногумусированные имеют профиль PUca,rh—RAu,ca—RAu,ca,nc—[профиль погребенной почвы].

Большая часть шлейфового пояса представлена вариациями намытых почв (карбонатно-гумусово-стратифицированных по РК-2004(22)). Фоновыми погребенными почвами являются темно-каштановые с полным набором горизонтов PUca,rh—AUra—ABca—BMKca—BCanc—BCsa,cs. Они приурочены к выпуклым и ровным в поперечном направлении участкам склона. Второй компонент вариации — погребенные темногумусовые аккумулятивно-карбонатные темноязыковатые (луговато-каштановые по К-1977) почвы, которые не имеют ксерометаморфического гор. BMK в

профиле: PUca,rh—AU—ABca—Bca,yu—BCanc—BCsa. Эти почвы расположены в слабовыраженных ложбинах.

Наличие невоскипающего гор. AU мощностью 15–30 см ниже распахаемого карбонатно-гумусированного намытого материала свидетельствует об очень быстром, почти залповом отложении поступавшего наноса. Если бы поступление было постепенным, то сравнительно небольшие порции намытого карбонатного материала перемешивались с горизонтом AU во время вспашки, образуя агротемногумусовый горизонт PU, вобрав в себя весь горизонт AU. В профиле могла бы сохраниться только нижняя часть гумусового слоя — переходный горизонт AB.

Такой элемент эрозионно-аккумулятивных структур почвенного покрова, как шлейфовый пояс в средней части общего склона, не выделяли [2, 3, 5, 8, 9, 12, 16, 20, 22, 29, 42, 44, 45, 49, 103]. Его аналогом на уровне микрорельефа можно считать локальное отложение переносимого материала на сложном склоне [2, 3, 7, 103].

Пологое подножие южного склона со средним уклоном 0.026 (1.48°) занято двумя ареалами, один из которых представлен вариацией агротемно-каштановых карбонатно-гумусово-стратифицированных темноязыковатых тяжелосуглинистых почв с разным карбонатным профилем (контур 2, рис. 2), а другой — почвами без намытого материала — агротемно-каштановыми темноязыковатыми сегрегационными глинисто-иллювирированными высоко-вскипающими глубоко гипсодержащими глубококвазиглееватыми тяжелосуглинистыми (контур 1, рис. 2, табл. 1). Намыв карбонатного гумусированного материала в ареале 2 сравнительно небольшой, но он обеспечил сплошное вскипание всего пахотного горизонта PUca,rh. Темногумусовый гор. AU в обоих ареалах полностью вовлечен в пахотный горизонт PU, при этом в профиле сохранился переходный гумусированный горизонт AB и ниже него — ксерометаморфический горизонт BMK.

На местности на этом пологом подножии южного склона ложбины почти незаметны в рельефе, но на космическом снимке они представлены более темными полосками, пересекающими склон в продольном направлении. В результате вариации почв обусловлены разным карбонатным профилем. В наиболее выпуклых частях склона между малозаметными ложбинами весь профиль почвы имеет сплошное вскипание от HCl, а в ложбинах под PUca,rh с намытым карбонатно-гумусированным материалом сохранились часть переходного гор. AB и ксерометаморфический горизонт BMKyu, не имеющие карбонатов.

Северный склон вытянутой гряды в целом имеет меньший общий уклон 0.019 (перепад высот около

10 м на расстоянии 525 м). По космическому снимку на склоне выделено четыре гипсометрических уровня с разным проявлением древовидной сети ложбин: недифференцированный в поперечном направлении пологий приводораздельный склон (уклон от 0.01 (0.57°) до 0.03 (1.72°)); поверхность с наибольшим уклоном 0.040–0.078 (2.29°–4.46°), в пределах которой закладываются слабовыраженные верховья широких мелких ложбин; выполаживающаяся часть склона (уклон 0.01–0.03 или 0.57°–1.72°) с сетью мелких ложбин; очень слабо наклонная поверхность (уклон 0.004–0.014 или 0.23°–0.80°) с древовидным рисунком ложбин разного порядка, собирающихся в наиболее крупные и более широкие ложбины (рис. 2b).

Структура почвенного покрова северного склона представлена сочетанием нескольких вариаций агротемно-каштановых почв на двух объединенных гипсометрических уровнях (контуры 12, 14, 15, рис. 2), рассекаемых вытянутыми разветвленными ареалами разных почв в днищах ложбин (контуры 13, 17–19, рис. 2) и сильноосмытых почв на выпуклых поверхностях (контур 16, рис. 2).

Приводораздельный пологий склон, переходящий в поверхность с наибольшим уклоном, занят вариацией агротемно-каштановых темнаязыковатых сегрегационных профильно-вскипающих глубокогипсодержащих глубоколосончачковатых глинистых почв на выпуклых частях склона с квазиглееватыми и/или слитизированными подтипами в верховьях слабовыраженных широких мелких ложбин (контур 12, рис. 2). Все почвы этой вариации имеют карбонаты по всему профилю, хорошо выраженный ксерометаморфический горизонт ВМК, рассекаемый вертикальными темными языками засыпанного в трещины гумусированного материала верхнего горизонта (признак уи), аккумулятивно-карбонатный горизонт с белоглазкой ВСAnc, наличие гипсовых новообразований и слабого засоления, начинающихся с глубины от 101 до 200 см. На вогнутых поверхностях сформировались слитизированные почвы со сликенсайдами в горизонте ВСAnc,yu,v.

На двух самых нижних объединенных гипсометрических уровнях северного склона наблюдается смена почвообразующих пород в поперечном направлении. Восточная часть представлена желто-бурыми суглинками, а западная — бурыми глинами. Восточная часть склона занята обширным ареалом агротемно-каштановых солонцеватых темнаязыковатых сегрегационных срединно вскипающих (с глубины 39–40 см) тяжелосуглинистых почв, содержащих новообразования мелкокристаллического гипса и слабое засоление в почвообразующей породе на глубине более 240 см (контур 15, рис. 2). Этот ареал расчленен вытянутым ареалом агротемно-каштановых глинисто-иллювирированных сегрегационных высоковскипающих

тяжелосуглинистых незасоленных почв в днище слабо выраженной широкой ложбины (восточный контур 17, рис. 2). Профиль почвы: PU–ВМКi–Vca,i–ВСAnc,i–ВСAnc–ВССa. Ареал 15 тяжелосуглинистых почв частично отделяется от вариации с глинистыми почвами (контур 14) мелкой узкой ложбиной с агротемно-каштановыми темнаязыковатыми сегрегационными срединно вскипающими (глубина 50–60 см) глинистыми незасоленными почвами (контур 18, рис. 2).

В западной части самых нижних гипсометрических уровней северного склона на бурых глинах сформировалась вариация агротемно-каштановых солонцеватых сегрегационных глинистых почв с варьированием глубины вскипания, наличием или отсутствием темных кутан (признак iu) и квазиглееватости глубже 100 см (контур 14, рис. 2). На вытянутых участках за счет водной эрозии возникли агроземы темные аккумулятивно-карбонатные сегрегационные высоковскипающие квазиглееватые глинистые, в которых бывший ксерометаморфический гор. ВМК полностью ассимилирован пахотным горизонтом (контур 16, рис. 2). Их профиль частично редуцирован: PU–PUpb,(ca)–Vca–ВСAnc–ВССa–ВССa,q.

В некоторых ложбинах произошел намыв карбонатно-гумусированного материала (контур 13, рис. 2), что приводит к усложнению карбонатного профиля: PUca,rh–PU2–ВМКsn–ВМКsn,ca–ВСAnc,sn. В широких мелких ложбинах в профиле агротемно-каштановых почв появляются глинистые кутаны на боковых гранях призматических отдельностей в верхней части аккумулятивно-карбонатного горизонта ВСAnc,i (контуры 17, рис. 2), а в относительно глубоких (около 25 см) ложбинах, в которые впадают более мелкие ложбины, в днище сформировался полноценный глинисто-иллювиальный горизонт В1 мощностью 21 см. Он расположен ниже ксерометаморфического горизонта ВМКi с редкими глинистыми кутанами (контур 19, рис. 2). Для этой почвы характерна самая большая глубина вскипания от НС1 в пределах северного склона, составляющая 66 см. Аккумулятивно-карбонатный горизонт в верхней части включает два вида карбонатных новообразований: прожилки мицелия и белоглазку, глубже только белоглазку при общей мощности горизонта 96 см. В результате профиль агротемно-каштановых глинисто-иллювиальных мицелиарно-сегрегационно-карбонатных срединно вскипающих глинистых незасоленных почв имеет формулу: PU–PUpb–ВМКi–В1–Vca,i–ВСAnc,mc–ВСAnc–ВССa.

Таким образом, на северном и южном склонах вытянутой гряды сформировались разные эрозионно-аккумулятивные почвенные комбинации, представленные на обоих склонах сочетаниями разных вариаций почв и вытянутых элементарных почвенных ареалов.

Гумусовые горизонты и содержание в них гумуса (табл. 2). Мощность пахотного горизонта (Р или РU) варьирует в интервале от 17 до 37 см, составляя в 94% случаев 20–32 см. В 75% случаев весь гумусовый слой представлен только этим горизонтом. В ряде почв в ложбинах и в области шлейфового пояса на южном склоне общая мощность гумусового слоя больше пахотного горизонта. Здесь гумусовый слой помимо пахотного горизонта включает темногумусовый АU, переходный горизонт АВ и/или намытый (стратифицированный) горизонт RA, содержащий гумусированный материал. В результате мощность гумусового слоя в таких позициях возрастает до 40–130 см.

Статистическое распределение содержания гумуса (выборка из 30 разрезов) в пахотном горизонте (0–20 см), согласно критерию Уилка–Шапиро, может быть аппроксимировано нормальным законом (табл. 3). Среднее значение содержания гумуса составляет 2.52%, наибольшее значение по участку – 3.4%, наименьшее – 1.4%. Наибольшее на участке значение соответствует существующему представлению о содержании гумуса в глинистых, тяжелосуглинистых и среднесуглинистых темно-каштановых почвах, основной диапазон значений содержания гумуса на участке совпадает с представлениями о таковом в каштановых почвах, минимальное значение оказалось даже ниже диапазона для светло-каштановых почв [10].

Таблица 2. Статистическая характеристика морфометрических свойств почв

Показатель	Статистический показатель										
	<i>n</i>	min	<i>Q1</i>	med	<i>Q3</i>	max	<i>M</i>	<i>sd</i>	<i>A</i>	<i>E</i>	<i>V</i> , %
Deff1, см	39	0	0	0	31	66	15	20	0.99	–0.3	133
Deff1d, см	7	7	20	27	27	29	23	8	–1.59	1.96	35
Deff2, см	7	37	41	43	52	82	50	16	1.71	2.6	32
P_down, см	39	17	25	27	28	37	26	4	–0.4	1.89	15
rh_down, см	10	7	21	27	27	29	23	7	–1.76	2.92	30
RA_down, см	3	60	Н.о.	83	Н.о.	100	81	20	Н.о.	Н.о.	25
AB_down, см	9	33	37	53	100	130	70	38	0.61	–1.47	54
M_hum, см	39	17	26	28	32	130	38	27	2.42	5.09	71
yu_down, см	19	48	68	70	74	90	70	10	–0.18	1.18	14
BMK_down, см	27	30	41	47	55	67	48	9	0.10	–0.66	19
M_BMK, см	27	5	13	17	23	33	18	7	0.32	–0.4	40
sn_down, см	14	42	60	70	72	95	68	13	0.29	1.06	19
M_sn, см	39	0	0	0	34	69	15	22	1.08	–0.17	147
M_Bca, см	39	0	4	11	16	63	11	11	2.71	12.67	100
BCA_up, см	39	21	40	48	59	130	54	25	1.30	1.66	46
M_BCA, см	39	16	35	43	50	100	46	18	1.24	1.84	39
D_up, см	9	28	100	100	160	190	118	51	–0.11	–0.25	43
Gyps_up, см	20	95	105	130	156	240	138	41	1.28	1.13	30

Примечание. Показатели свойств почв: Deff1 – глубина вскипания от HCl, первая от поверхности; Deff1d – нижняя граница первого от поверхности слоя, имеющего вскипание от HCl; Deff2 – верхняя граница второго от поверхности слоя, имеющего вскипание от HCl, после слоя, не имеющего вскипания и лежащего между двумя карбонатными слоями; P_down, RA_down, AB_down, BMK_down, rh_down, yu_down, sn_down – глубина нижней границы горизонтов Р (или РU, агрогумусового или агротемногумусового), RA (стратифицированного гумусового), АВ (переходного), BMK (ксерометаморфического), и признаков rh (гумусово-стратифицированного), yu (темноязыковатого), sn (солонцеватого) соответственно; M_hum, M_BMK, M_Bca, M_BCA – мощность гумусового слоя (hum), горизонтов BMK, Bca, BCA соответственно; BCA_up, D_up, Gyps_up – глубина верхней границы горизонта BCA, подстилающей породы (D), проявления гипсовых новообразований (Gyps) соответственно. Статистические показатели: *n* – объем выборки; min, max – минимальное и максимальное значение; *Q1*, *Q3* – нижний и верхний квартили; med – медиана; *M* – среднее; *sd* – среднеквадратическое отклонение; *A* – асимметрия; *E* – эксцесс; *V* – коэффициент вариации. Н.о. – не определяли.

Таблица 3. Статистические характеристики содержания гумуса и карбонатов кальция (эквивалент CaCO_3) в пахотном слое 0–20 см

Статистический показатель	Гумус, %	CaCO_3 , %
Объем выборки	30	30
Минимум	1.40	0.32
10% персентиль	2.04	0.47
Нижний квартиль	2.22	1.2
Медиана	2.49	2.08
Верхний квартиль	2.80	3.01
90% персентиль	3.01	4.37
Максимум	3.40	6.65
Среднее значение	2.52	2.36
Стандартное отклонение	0.45	1.65
Асимметрия	–0.16	1.04
Экссесс	0.23	0.88
$W_{\text{факт}}$	0.981	0.902
$W_{0.05\text{ n}}$	0.927	0.927
Распределение	Нормальное	Другое

В Донской и Заволжской почвенных провинциях [10] в середине прошлого века мощность гумусового слоя А + АВ обычно составляла до 40–50 см. Сравнивая эти значения с мощностью пахотного горизонта, который преимущественно представляет весь гумусовый слой на исследуемом участке, и учитывая соотношение содержания гумуса в пахотном слое на участке с преимущественными пределами изменчивости этого показателя в разных подтипах каштановых почв, согласно классификации почв СССР, можно допустить заметное проявление эрозионных процессов в изученной структуре почвенного покрова.

Содержание карбонатов в пахотном горизонте и характер вскипания от 10%-ной HCl . Статистическое распределение глубины вскипания (Deffl) отличается от нормального. Это связано с тем, что больше половины обследованных почвенных разрезов (24 из 39) имеют вскипание от HCl с дневной поверхности. Среди карбонатных с поверхности почв выделяются три группы по карбонатному профилю: (1) агротемно-каштановые (9 разрезов) и агроземы аккумулятивно-карбонатные (5 разрезов) профильно-вскипающие, в которых карбонаты в пахотном горизонте появились в результате припашки нижележащих карбонатных горизонтов ВМКса, Вса, ВСАпс после частичного эрозионного смыва гумусового горизонта; (2) сложно-вскипающие разные почвы (7 разрезов), в которых

пахотный горизонт включает карбонатно-гумусированный намытый материал с вышележащих позиций рельефа; объемы поступившего намытого материала сравнительно небольшие, что способствовало сохранению под карбонатным пахотным горизонтом невоскипающих горизонтов АУ, АВ или ВМК; (3) агростратоземы (3 разреза), имеющие карбонаты по всему профилю как в намытых горизонтах РУса, rh, RAu, са, так и в погребенных частично смытых почвах под ними.

В остальных 15 разрезах глубина вскипания меняется от 20 до 66 см. Наибольшие значения (>55 см) характерны для почв в ложбинах. В почвах северного склона на ровных или слабовыпуклых позициях глубина вскипания составляет 30–42 см. Наименьшие значения глубины вскипания характерны для почв водораздела и южного склона исследуемой гривы.

Содержание CaCO_3 в пахотном горизонте почв не подчиняется нормальному статистическому распределению как для всей выборки ($n = 30$), так и для ее части, включающей вскипающие с поверхности почвы ($n = 24$). В почвах с отсутствием вскипания от HCl с поверхности содержание CaCO_3 варьирует в пределах 0.3–1.0%, в почвах с карбонатным пахотным горизонтом – от 0.75 до 6.65%. Наибольшие значения встречаются в агроземно-каштановых профильно-вскипающих почвах диапазон варьирования содержания CaCO_3 от 0.75 до 4.13%, в агротемно-каштановых карбонатно-гумусово-стратифицированных – от 1.65 до 2.35%, в агростратоземах – от 2.9 до 3.2%. Иными словами, основным источником карбонатов в пахотном слое являются природные карбонатные горизонты почв, которые вовлекаются в пахотный слой по мере эрозионного сноса части материала верхних горизонтов. Чем сильнее смыт почвенный профиль, тем больше карбонатов оказывается в пахотном горизонте. Аккумулируемый карбонатный материал в процессе переноса частично разбавляется материалом, не содержащим карбонаты.

Между содержанием гумуса и CaCO_3 в пахотных горизонтах существует слабая обратно пропорциональная связь ($R^2 = 0.35$), обусловленная неоднозначным сочетанием исходного пространственного распределения содержания гумуса в поверхностных горизонтах разных почв до проявления эрозии с последующими эрозионно-аккумулятивными процессами удаления, переноса, перемешивания и отложения материала в условиях использования отвальной вспашки.

Все агротемно-каштановые почвы имеют *ксерометаморфический горизонт ВМК* между поверхностными гумусовыми (АУ, РУ, АВ) и срединным аккумулятивно-карбонатным ВСАпс горизонтами. Он имеет бурый, рыжевато- или

коричневато-бурый цвет (каштановый), ореховато-призматическую или призматическую структуру первого порядка с матовыми гранями без кутан и мелкими крупитчатыми агрегатами второго порядка. На исследуемом участке горизонт ВМК диагностирован в 27 разрезах (из 39). Глубина его нижней границы варьирует от 30 до 67 см с медианой 47 см, мощность горизонта — от 5 до 33 см с медианой 17 см. В половине разрезов (14 из 27) признаки солонцеватости отсутствуют, в другой половине (13 из 27) в горизонте ВМК_{sp} — серые гумусовые кутаны на боковых гранях призматических агрегатов, отражающие наличие солонцеватости. На водоразделе и прилегающих склонах гряды до абсолютной высоты 105 м большая часть агротемно-каштановых почв имеет карбонатный ксерометаморфический горизонт ВМК_{са}, который дополнительно рассечен вертикальными трещинами с темными засыпками гумусированного материала верхнего горизонта (признак уи — темная языковатость).

Аккумулятивно-карбонатный горизонт ВСА встречается во всех почвах участка. Глубина верхней его границы варьирует от 21 до 130 см с медианой 48 см, мощность ВСА — от 16 до 100 см с медианой 43 см. В большинстве почвенных разрезов карбонатные новообразования представлены белоглазкой, только в одном разрезе в днище ложбины отмечен карбонатный мицелий в виде прожилок.

По сравнению с агрокаштановыми почвами опытной станции “Орошаемая” [77], расположенными на юге Приволжской возвышенности приблизительно в 100 км восточнее, на исследуемом участке в агротемно-каштановых почвах мощность ксерометаморфического горизонта ВМК больше на 7 см по медиане и на 12 см по максимуму, а мощность ВСА_{nc} приблизительно одинаковая как по медиане (40 и 43 см), так и по другим непараметрическим показателям.

Засоленность почв (рис. 3) проявляется глубже 100 см в основном на верхней части вытянутой гряды, включая приводораздельные пологие склоны по обе стороны, на наиболее крутой части северного склона, а также на пологой части южного склона ниже шлейфового пояса. Распространенные на участке агротемно-каштановые глинистые почвы относятся к виду глубокосолончаковатых и глубокозасоленных (верхняя граница засоленного горизонта в интервалах 100–150 и 150–200 см соответственно). Слабое засоление приурочено к горизонтам с новообразованиями мелкокристаллического гипса в виде прожилок.

Непосредственно на водораздельном пространстве (уровень 5, разрез МР-38) химизм засоления хлоридно-сульфатный с гипсом, преимущественно натриевый, возможно встречается магниевонатриевый. На обоих склонах гряды хлориды вымыты полностью до глубины 2–3 м — активность Cl^- в пастах

с влажностью 50% не превышает 1 ммоль/л (менее 0.05 смоль(экв)/кг в пересчете на массу почвы) по всему профилю. Это проявляется даже на приводораздельных склонах (уровни 4 и 6, рис. 3). Увеличение активности ионов Na^+ вниз по профилю обусловлено присутствием сульфатов натрия в почвенном растворе. Следовательно, химизм засоления по анионам меняется с хлоридно-сульфатного с гипсом на водоразделе на сульфатный с гипсом на склонах.

На пологой части северного склона с сетью дровидных ложбин все почвы промыты от солей до глубины 240 см и более. Почвы наиболее крутой части и шлейфового пояса южного склона также не имеют засоления до 2 м.

Связь ареалов почвенной карты с мультимедийными спектральными характеристиками открытой поверхности почв. Контуры почвенной карты ключевого участка совмещены в ГИС с растровым слоем значений коэффициента S мультимедийной линии почв (рис. 4). Для каждого контура почвенной карты получена статистика значений коэффициента S : объем выборки, минимум, максимум, среднее арифметическое, среднеквадратическое отклонение (табл. 4). На этой основе получена матрица значимости различия средних значений коэффициента S отдельных 33 ареалов почвенных комбинаций (ПК) при парном их сравнении (рис. 5а).

Ее анализ показывает, что нет ни одного контура почвенной карты, который бы значимо отличался от всех остальных контуров (в пределах любой строки или любого столбца рис. 5а встречаются оба знака “+” и “–”). Вместе с тем некоторые контуры имеют значимые отличия с большим числом других ареалов, другие — с меньшим. Следовательно, необходима группировка почвенных контуров по почвенным или спектральным характеристикам.

Прежде всего, на почвенной карте четыре ПК (номера 4, 5, 7, 17 в табл. 1) представлены несколькими (от 3 до 6) индивидуальными ареалами, которые не отличаются друг от друга по почвенной номенклатуре. На рис. 5а они выделены квадратными рамками. Из них только вариация агроземов на крутой части южного склона гряды (ПК 5) имеет сравнительно крупные ареалы, две других (ПК 4 и 17) — сильновытянутые ареалы, приуроченные к ложбинам, и одна (ПК 7) — сравнительно мелкие ареалы каплевидной формы в верховьях ложбин южного склона. Индивидуальные ареалы ПК 4 и ПК 7 не значимо отличаются друг от друга (знаки “–” на пересечениях ареалов 4.1–4.6 и 7.1–7, рис. 5а) как среди своей ПК, так и от ареалов другой ПК. В ПК 5 и ПК 17 отмечается некоторая неоднородность значимости между ареалами по коэффициенту S мультимедийной линии почв — в пределах прямоугольников на рис. 5а, ограничивающих ареалы одной ПК, имеются оба знака оценки значимости.

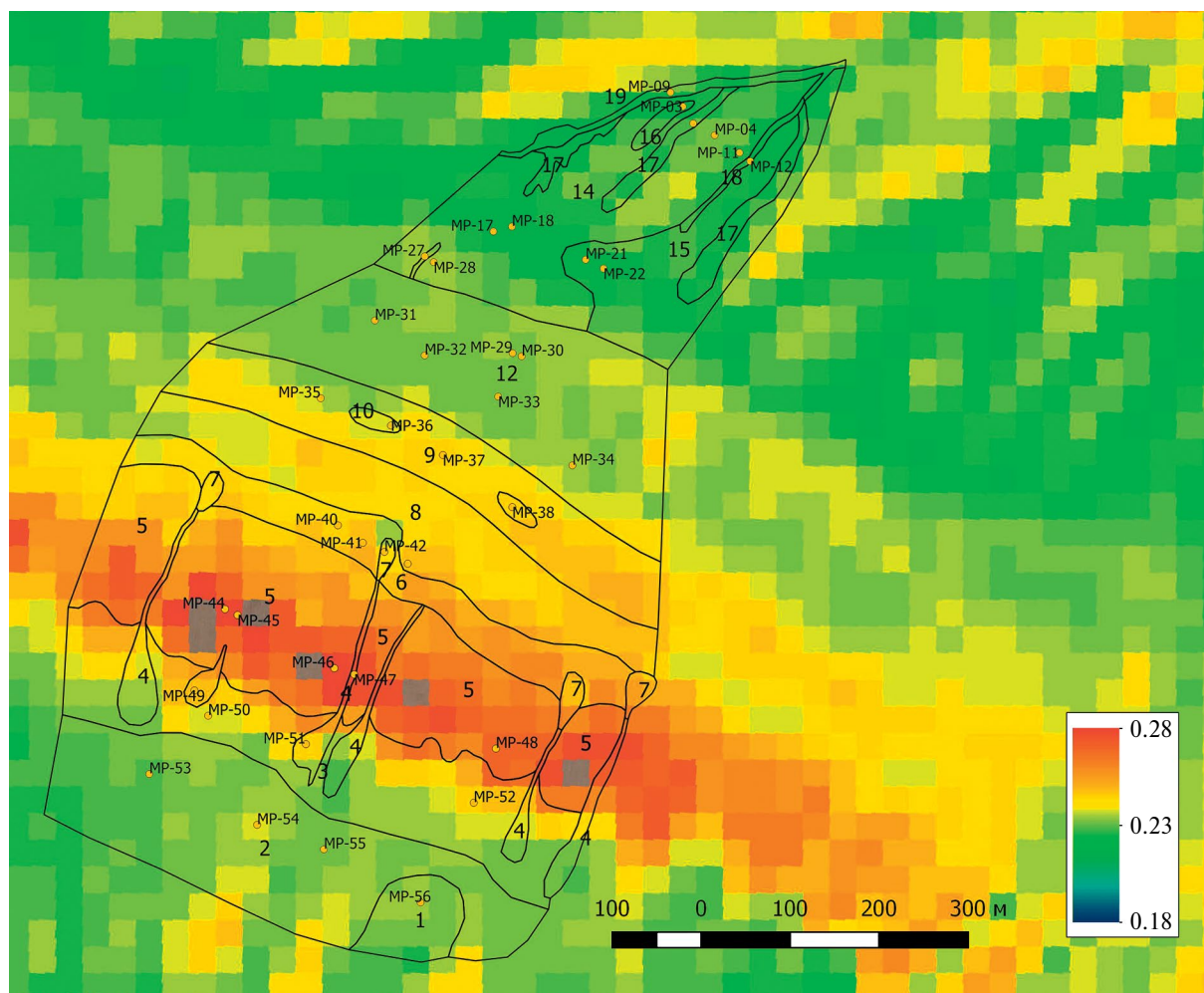


Рис. 4. Эрозионно-аккумулятивная структура почвенного покрова на фоне значений коэффициента C мультитременной линии почвы, ключевой участок возле хутора Сиволобов. Цифры 1–19 – номера почвенных комбинаций (см. табл. 1); точки с подписями MP-03...MP-56 – почвенные разрезы.

На втором этапе анализа индивидуальные ареалы каждой из четырех указанных ПК были объединены в группы, для которых получили обобщенные статистические характеристики коэффициента C мультитременной линии почв с учетом числа пикселей. Таким образом получены характеристики 19 почвенных комбинаций, обозначенных в легенде, по которым составили матрицу сравнения (рис. 5b).

При такой группировке ареалов почвенной карты комбинации 5 и 9 значительно отличаются друг от друга и всех иных почвенных комбинаций. В строках и столбцах с номерами 5 и 9 на рис. 5b все пересечения имеют знак “+” на зеленом поле, исключая голубые ячейки центральной диагонали. Напомним, что ПК 5 представлена сильноосмытыми почвами (агроземами карбонатными) на крутой части южной склона, а ПК 9 – агротемно-каштановыми слабосмытыми или дефлированными почвами с карбонатными пахотными горизонтами на

водораздельном пространстве гряды. Из граничащих друг с другом ПК нет значимых различий между ПК 1 и 2 на нижней пологой части южного склона, между ПК 3 и 4 на шлейфовой части южного склона, между ПК 6 и 7 выше крутой части южного склона, между ПК 12 и 13 на более крутой части северного склона, между многими (но попарно не всеми) ПК (14–19) на нижней пологой части северного склона. Вместе с тем неразличимые комбинации объединяются спектрально вполне осмысленно. Так, комбинации 3 и 4 не различимы между собой и с комбинациями 6–8 и 11. Действительно эти 6 разных комбинаций находятся в близких позициях по рельефу по отношению к сильноэродированным почвам (ПК 5), но с разных сторон. Более интересным представляется анализ после объединения почвенных комбинаций, граничащих друг с другом и не имеющих значимых различий между собой (рис. 5с).

Таблица 4. Статистические характеристики коэффициента *C* мультिवременной линии почв ареалов почвенной карты ключевого участка

Номер ареала*	Площадь, га	<i>N</i>	<i>N</i> /36	Коэффициент <i>C</i> мультивременной линии почв			
				min	max	<i>M</i>	STD
Индивидуальные ареалы почвенной карты							
1	0.89	356	9.86	0.22588	0.23589	0.23308	0.00153
2	6.565	2626	72.93	0.22413	0.24507	0.23283	0.00269
3	5.03	2012	55.97	0.22927	0.28048	0.24502	0.01108
4.1	0.4	160	4.46	0.23254	0.26907	0.24206	0.00948
4.2	0.128	51	1.41	0.24754	0.269	0.25445	0.00595
4.3	0.26	104	2.91	0.23546	0.27685	0.25466	0.01162
4.4	0.26	104	2.85	0.22927	0.27633	0.24542	0.01445
4.5	0.165	66	1.84	0.23144	0.27668	0.24622	0.01343
4.6	0.292	117	3.2	0.22974	0.27593	0.24903	0.01745
5.1	1.538	615	17.17	0.23757	0.27341	0.25329	0.01104
5.2	4.038	1615	44.83	0.23959	0.28516	0.26191	0.01239
5.3	0.488	195	5.39	0.2418	0.27685	0.26234	0.00992
5.4	2.37	948	26.25	0.24903	0.2833	0.26456	0.0072
5.5	0.722	289	8	0.24883	0.28094	0.269	0.00791
6	2.56	1024	28.43	0.23395	0.26083	0.24644	0.00637
7.1	0.08	32	0.9	0.23721	0.24324	0.24129	0.00149
7.2	0.07	26	0.67	0.23631	0.2418	0.23905	0.00275
7.3	0.112	45	1.32	0.24883	0.26116	0.25042	0.00343
7.4	0.11	44	1.22	0.24312	0.2527	0.24854	0.00389
8	4.205	1682	46.71	0.23475	0.25088	0.24295	0.00343
9	4.105	1642	45.65	0.23099	0.25031	0.24046	0.00485
10	0.1	40	1.07	0.23331	0.23868	0.23506	0.00219
11	0.088	35	0.96	0.24163	0.24485	0.24368	0.00135
12	7.012	2805	77.92	0.2287	0.24286	0.23345	0.00257
13	0.028	11	0.28	0.23138	0.23448	0.2326	0.00138
14	5.128	2051	56.87	0.21621	0.23897	0.22667	0.00529
15	2.715	1086	30.16	0.21788	0.23654	0.22508	0.00407
16	0.108	43	1.34	0.22275	0.23073	0.22517	0.00254
17.1	0.19	76	2.07	0.21621	0.22614	0.21932	0.00307
17.2	0.282	113	3.22	0.22373	0.23145	0.22679	0.00221
17.3	0.482	193	5.4	0.21788	0.23168	0.22325	0.00288
18	0.138	55	1.41	0.21959	0.22965	0.22426	0.00217
19	0.415	166	4.68	0.21621	0.23929	0.22576	0.00648
Обобщенные характеристики почвенных комбинаций с несколькими ареалами							
4	1.505	602	16.72	0.22927	0.27685	0.24768	0.01285
5	9.156	3662	101.72	0.23757	0.28516	0.26173	0.01057
7	0.372	147	4.08	0.23631	0.26116	0.24586	0.00315
17	0.954	382	10.61	0.21621	0.23168	0.22352	0.00274
Характеристики объединенных почвенных комбинаций							
1...2	7.455	2982	82.83	0.22413	0.24507	0.23286	0.00258
3...4	5.43	2614	72.61	0.22927	0.28048	0.24563	0.01151
6...7	1.171	1171	32.53	0.23395	0.26116	0.24637	0.00606
13...19	9.486	3794	105.39	0.21621	0.23929	0.22582	0.00475

Примечание. Обозначения номеров индивидуальных ареалов, отдельных почвенных комбинаций и объединенных почвенных комбинаций см. на рис. 5. *N* – число пикселей 5×5 м², *N*/36 – число пикселей 30 × 30 м², min, max – минимальное и максимальное значение; *M* – среднее арифметическое; STD – среднеквадратическое отклонение.

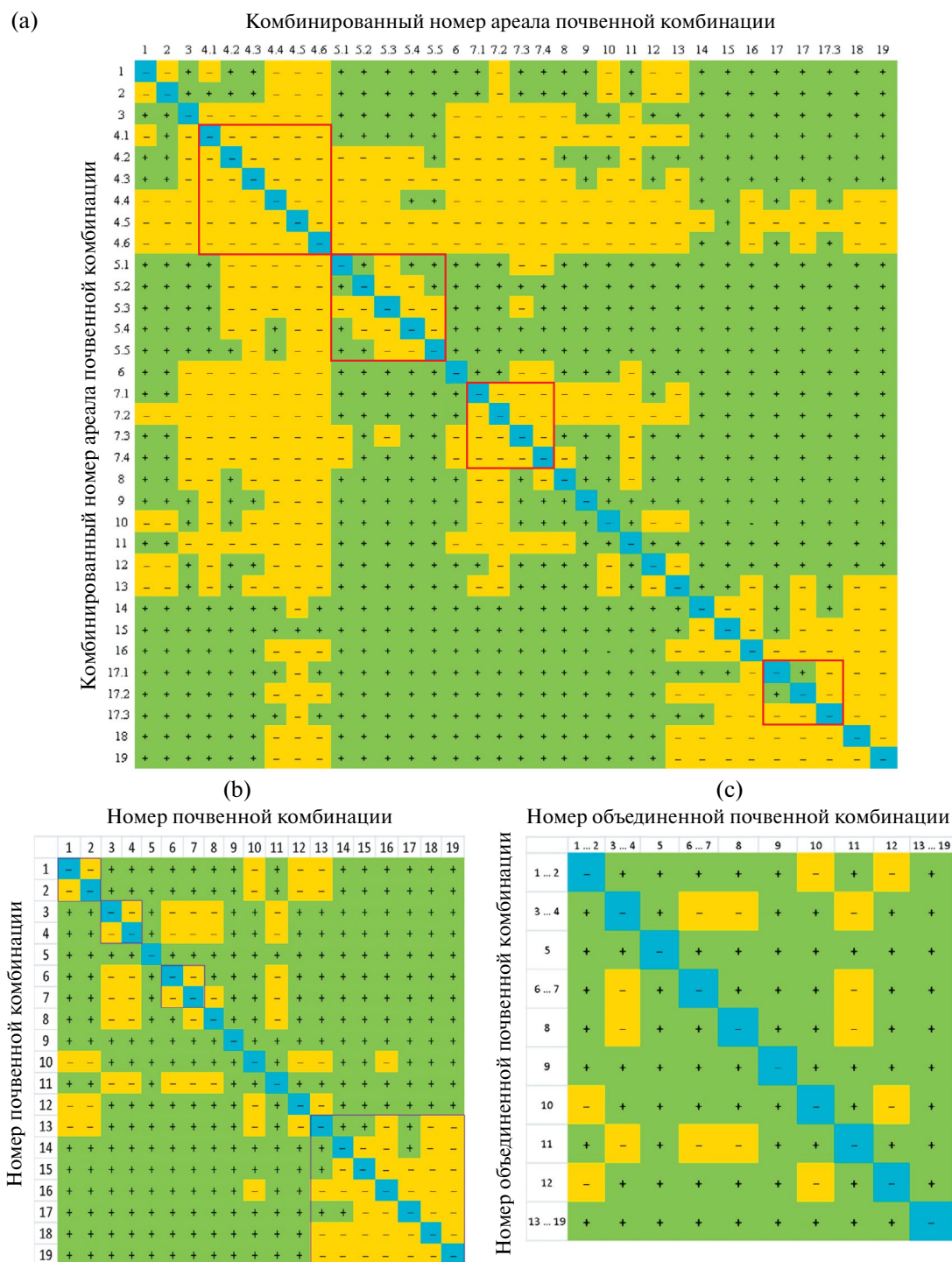


Рис. 5. Матрица значимости различия средних значений коэффициента C мультитременной линии почв на исследуемом ключевом участке при парном сравнении: (а) — отдельных ареалов почвенных комбинаций; комбинированный номер ареала почвенной комбинации получен добавлением к номеру почвенной комбинации (табл. 1) после точки порядкового номера ареала той же почвенной комбинации; прямоугольной рамкой выделены все индивидуальные ареалы одной почвенной комбинации; (б) — почвенных комбинаций после обобщения статистических характеристик индивидуальных ареалов одной и той же почвенной комбинации; нумерацию см. табл. 1; прямоугольной рамкой выделены почвенные комбинации, которые объединены на следующем этапе анализа в связи с их соседством и отсутствием значимых различий между собой; (с) — отдельных и объединенных почвенных комбинаций; объединение почвенных комбинаций обозначено знаком "...". Знак "+" — различия значимы, знак "—" — различия не значимы при доверительной вероятности 0.95.

Результат объединения (рис. 5с) показал, что между всеми парами объединенных ПК и/или отдельных ПК, имеющих общие границы, получены значимые различия коэффициента C мультिवременной линии почв (прилегающие к центральной диагонали ячейки на рис. 5с все имеют знак “+” на зеленом поле). ПК 5, 9 и объединенные ПК 13–19 значимо отличаются друг от друга и всех остальных объединенных и отдельных ПК (соответствующие строки и столбцы на рис. 5с только со знаками “+”).

На этом фоне на участке имеются разные ПК, не граничащие друг с другом и не имеющие значимых различий средних значений коэффициента C между ними (рис. 5с). Такими парами являются следующие:

(1) Объединенная ПК 1–2 в нижней части южного склона с агротемно-каштановыми карбонатно-гумусово-стратифицированными (намытыми) почвами и индивидуальная ПК 12 на крутой части северного склона с агротемно-каштановыми профильно-вскипающими почвами; обе группы почв вскипают с дневной поверхности и имеют в профиле засыпки гумусированного материала в вертикальные трещины (признак u_1 – темная языковатая), однако в ПК 2 почвы намытые, а в ПК 12, наоборот, смытые.

(2) Объединенная ПК 3–4 на шлейфовом поясе южного склона с агротемно-каштановыми карбонатно-гумусово-стратифицированными почвами и агростратоземами карбонатно-темногумусовыми и объединенная ПК 6–7, и индивидуальная ПК 8 в верхней части этого склона; общим свойством почв всех ПК данных пар является вскипание от НС1 с дневной поверхности, но в ПК 3, ПК 4, ПК 7 почвы намытые, а в ПК 6 и ПК 8 – смытые.

Таким образом, с помощью коэффициента C мультिवременной линии почв на исследуемом ключевом участке уверенно отличаются, во-первых, водораздельная поверхность с агротемно-каштановыми профильно-вскипающими почвами (ПК 9), имеющими карбонаты с поверхности и укороченный гумусовый профиль в результате слабой эрозии; во-вторых, крутая часть южного склона с сильно смытыми почвами (агроземы карбонатные, ПК 5); в-третьих, группа вариаций агротемно-каштановых почв разных подтипов и родов на нижней пологой части северного склона с древоидной сетью ложбин. Почвенные комбинации смытых и намытых почв, расположенные между указанными выше тремя группами ПК, значимо отличаются от соседей, но их интерпретация имеет повышенную неопределенность, поскольку вариации намытых почв на одном склоне по спектральным характеристикам мультिवременной линии почв не отличаются от смытых почв в других частях склона. Для их распознавания, очевидно,

потребуется информация о сопряжении ареалов почв на разных элементах рельефа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящем исследовании обосновано, что важным новым инструментом изучения структуры почвенного покрова является карта коэффициента C мультиспектральной линии почв. Она представляет собой особую генерализацию вариации во времени спектральных характеристик открытой поверхности почв в конкретной точке (пикселе ДДЗ) и создание модели ее устойчивой пространственной неоднородности. Эту карту строят на основе анализа больших данных дистанционного зондирования без калибровок по наземным изысканиям [13, 14, 37, 38, 92, 93]. Технология ее построения автоматизирована.

Преимуществом нового инструмента является целостное представление об устойчивой пространственной неоднородности мультिवременных спектральных характеристик открытой дневной поверхности на большие территории, что невозможно получить на основе отдельных космических снимков. На отдельных кадрах ДДЗ фиксируется разное состояние полей в один срок съемки: разные культуры в разные периоды их вегетации или уборки, открытая поверхность почвы с разной влажностью и др. Карта коэффициента C мультिवременной линии почв особым образом объединяет усредненные во времени характеристики открытой поверхности почвы, исключая ситуации покрытия поверхности растениями или пожнивными остатками.

В настоящем исследовании карта коэффициента C мультिवременной линии почв послужила главным информационным материалом, свидетельствующим о закономерном пространственном распределении ареалов в эрозионно-аккумулятивных структурах почвенного покрова территорий Морозовского и Обливского районов Ростовской области. Хотя о влиянии эрозионных процессов на почвенный покров этой территории известно давно по результатам крупномасштабного почвенного картографирования и их обобщения [49], именно на основе карты коэффициента C мультिवременной линии почв стал возможен выбор представительного ключевого участка и составление плана наземного опробования почв.

Исследованная структура почвенного покрова ключевого участка в Обливском районе Ростовской области представлена сочетанием разных вариаций малококонтрастных почв на выпуклых и вогнутых поверхностях в пределах вытянутой гряды и ее склонов с доминированием агротемно-каштановых солонцеватых и несолонцеватых почв. Ее формирование обусловлено сочетанием форм мезорельефа и двух видов почвообразующих пород.

На узком водораздельном пространстве сформировалась вариация агроотменно-каштановых солонцеватых темнойязыковатых глубокогипсодержащих квазиглееватых и глубококвазиглееватых глубокосолончаковатых глинистых почв с разной глубиной вскипания от НС1, пониженной мощностью гумусового слоя, ограниченного только пахотным горизонтом, и пониженным содержанием гумуса в результате эрозии.

На более крутом южном склоне гряды структура почвенного покрова представлена сложным сочетанием на нескольких гипсометрических ярусах разных сочетаний-вариаций смытых и намытых почв, расчлененных в поперечном направлении узкими ложбинами. На верхних ярусах преимущественно происходит эрозионное удаление материала с максимумом на наиболее крутой части склона, приводя к формированию разных типов агроземов с карбонатами в пахотном слое. Ниже расположен шлейфовый пояс с максимальным намывом карбонатно-гумусированного материала, где образовались стратоземы и стратифицированные почвы. Еще ниже шлейфовый пояс переходит в более пологий склон с менее выраженным намывом карбонатно-гумусированного материала на агроотменно-каштановые почвы. В ложбинах строение профилей почв демонстрирует чередование периодов эрозии поверхностных горизонтов и накопления материала.

Структура почвенного покрова менее крутого северного склона представлена сочетанием нескольких вариаций агроотменно-каштановых почв на четырех гипсометрических уровнях, рассекаемых вытянутыми разветвленными ареалами разных почв в днищах ложбин и вытянутыми ареалами сильно смытых почв на выпуклых поверхностях.

Набухающие глины, являющиеся почвообразующими породами в верхней части вытянутой гряды, способствовали развитию на вогнутых поверхностях слитизированных почв, а также появлению темной языковатости во многих почвах гряды за счет засыпки гумусированного материала верхних горизонтов в периодически открывающиеся трещины.

Карта коэффициента *C* мультитременной линии почв выявляет неоднородность почвенного покрова, обусловленную проявлением эрозионно-аккумулятивных процессов. На исследуемом ключевом участке уверенно отличаются три контрастные почвенные комбинации в виде разных вариаций и сочетания-вариации, образующие своеобразный каркас структуры почвенного покрова. Хорошо выделяются по мультитременным спектральным характеристикам открытой поверхности почв, во-первых, водораздельная поверхность с агроотменно-каштановыми профилево-вскипаящими почвами (ПК 9), имеющими карбонаты с

поверхности и укороченный гумусовый профиль в результате слабой эрозии; во-вторых, крутая часть южного склона с сильно смытыми почвами (агроземы карбонатные, ПК 5); в-третьих, группа вариаций агроотменно-каштановых почв разных подтипов и родов на нижней пологой части северного склона с древовидной сетью ложбин. Почвенные комбинации смытых и намытых почв, расположенные между указанными выше тремя группами ПК, значимо отличаются от соседей, но их интерпретация имеет повышенную неопределенность, поскольку вариации намытых почв на одном склоне по спектральным характеристикам мультитременной линии почв не отличаются от смытых почв в других частях склона. Для их распознавания, очевидно, потребуется информация о сопряжении ареалов почв на разных элементах рельефа. В целом, карта коэффициента *C* мультитременной линии почв показала высокую эффективность в выборе ключевого участка, области возможной экстраполяции наземных изысканий и планировании полевых работ.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы благодарят сотрудников Испытательного лабораторного центра Федерального исследовательского центра "Почвенный институт имени В.В. Докучаева" за выполнение химических анализов определения содержания гумуса и карбонатов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено в рамках НИР № FGUR-2022-0009.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

В данной работе отсутствуют исследования человека или животных.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аникин А.С. Формирование структуры почвенного покрова в связи с развитием процессов эрозии и дефляции в южно-таёжной зоне Западной Сибири // Известия Оренбургского гос. аграрного ун-та. 2009. Т. 4. № 24-1. С. 16–18.
2. Геннадиев А.Н., Жидкин А.П., Олсон К.Р., Качинский В.Л. Эрозия и потери органического углерода почв при распашке склонов // Вестник Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2010. № 6. С. 32–38. <https://cyberleninka.ru/article/n/>

- eroziya-i-poteri-organicheskogo-ugleroda-pochv-pri-raspashke-sklonov
3. Геннадиев А.Н., Кошовский Т.С., Жидкин А.П., Ковач Р.Г. Латеральная миграция твердофазного вещества почв в пределах ландшафтно-геохимической арены (метод магнитного трассера) // Почвоведение. 2013. № 10. С. 1–12. <https://doi.org/10.7868/S0032180X13100043>
 4. Глазунов Г.П., Гендугов В.М. Модель крупномасштабного явления ветровой эрозии почв и ее верификация // Почвоведение. 2003. № 2. С. 228–239.
 5. Годельман Я.М. Неоднородность почвенного покрова и использование земель. М.: Наука, 1981. 200 с.
 6. Долгова Д.А., Рейнгард Я.Р., Аникин А.С., Долженко С.В. Структура почвенного покрова территорий с грядными формами рельефа в степной зоне Омской области при развитии процессов деградации почв // Вестник Бурятской гос. с./х. академии им. В.Р. Филиппова. 2010. № 3 (20). С. 15–18. https://elibrary.ru/download/elibrary_15240696_36927163.pdf
 7. Жидкин А.П., Комиссаров М.А. Эрозионно-аккумулятивные микроструктуры почвенного покрова в лесостепной зоне Предуралья Республики Башкортостан // Вестник Башкирского гос. аграрного ун-та. 2020. № 1(53). С. 12–20. <https://doi.org/10.31563/1684-7628-2020-53-1-12-20>
 8. Жидкин А.П., Смирнова М.А., Геннадиев А.Н., Лукин С.В., Заздравных Е.А., Лозбенев Н.И. Цифровое моделирование строения и степени эродированности почвенного покрова (Прохоровский район Белгородской области) // Почвоведение. 2021. № 1. С. 17–30. <https://doi.org/10.31857/S0032180X21010159>
 9. Заславский М.Н. Эрозиоведение. М.: Высшая школа, 1983. 320 с.
 10. Классификация и диагностика почв СССР. М.: Колос, 1977. 247 с.
 11. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
 12. Козлов Д.Н., Жидкин А.П., Лозбенев Н.И. Цифровое картографирование эрозионных структур почвенного покрова на основе имитационной модели смыва (северная лесостепь Среднерусской возвышенности) // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2019. Вып. 100. С. 5–35. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2019-100-5-35>
 13. Королева П.В., Рухович Д.И., Рухович А.Д., Рухович Д.Д., Куляница А.Л., Трубников А.В., Калинина Н.В., Симакова М.С. Местоположение открытой поверхности почвы и линии почвы в спектральном пространстве RED–NIR // Почвоведение. 2017. № 12. С. 1435–1446. <https://doi.org/10.7868/S0032180X17100045>
 14. Королева П.В., Рухович Д.И., Рухович А.Д., Рухович Д.Д., Куляница А.Л., Трубников А.В., Калинина Н.В., Симакова М.С. Характеристика почвенных типов и подтипов в N-мерном пространстве коэффициентов мультимедийной (эмпирической) линии почв // Почвоведение. 2018. № 9. С. 1085–1098. <https://doi.org/10.1134/S0032180X1809006X>
 15. Кошелев А.В. Картографирование почвенного покрова эрозионных агроландшафтов Волгоградской области на основе цифровой модели рельефа // Приоритетные направления развития современной науки молодых ученых аграриев. Материалы V-й междунар. науч.-пр. конф. молодых ученых, посвященные 25-летию ФГБНУ “Прикаспийский НИИ аридного земледелия”. Соленое Займище. 2016. С. 161–164.
 16. Кулик К.Н., Рулев А.С., Юферев В.Г. Геоинформационное моделирование структуры и динамики агролесоландшафтов // Экосистемы: экология и динамика. 2017. Т. 1. № 2. С. 5–20.
 17. Куляница А.Л., Рухович Д.И., Королева П.В., Вильчевская Е.В., Калинина Н.В. Анализ информативности методов обработки больших спутниковых данных систем точного земледелия при коррекции крупномасштабных почвенных карт // Почвоведение. 2020. № 12. С. 1460–1477. <https://doi.org/10.31857/S0032180X20110088>
 18. Куляница А.Л., Рухович А.Д., Рухович Д.Д., Королева П.В., Рухович Д.И., Симакова М.С. Применение кусочно-линейной аппроксимации спектральной окрестности линии почв для анализа качества нормализации материалов дистанционного зондирования // Почвоведение. 2017. № 4. С. 401–410. <https://doi.org/10.7868/S0032180X17040049>
 19. Ларионов Г.А., Добровольская Т.Г., Краснов С.Ф., Лиу Б.И. Новое уравнение для оценки фактора рельефа для эмпирической модели эрозии почв // Почвоведение. 2003. № 10. С. 863–871.
 20. Литвин Л.Ф. География эрозии почв сельскохозяйственных земель России. М.: РФФИ, 2002. 254 с. https://www.rfbr.ru/rffi/ru/books/o_36421
 21. Литвин Л.Ф., Кирюхина З.П., Краснов С.Ф., Добровольская Н.Г., Горобец А.В. География динамики земледельческой эрозии почв Сибири и Дальнего Востока // Почвоведение. 2021. № 1. С. 136–148. <https://doi.org/10.31857/S0032180X2101007X>
 22. Мальцев К.А., Голосов В.Н., Гафуров А.М. Цифровые модели рельефа и их использование в расчетах темпов смыва почв на пахотных землях // Ученые записки Казанского ун-та. Сер. Естественные науки. 2018. Т. 160. Кн. 3. С. 514–530. <https://cyberleninka.ru/article/n/tsifrovye-modeli-reliefa-i-ih-ispolzovanie-v-raschyotah-tempov-smывa-pochv-na-pahotnyh-zemlyah>
 23. Мальцев К.А., Ермолаев О.П. Потенциальные эрозионные потери почвы на пахотных землях европейской части России // Почвоведение. 2019. № 12. С. 1502–1512. <https://doi.org/10.1134/S0032180X19120104>

24. Научные основы предотвращения деградации почв (земель) сельскохозяйственных угодий России и формирования систем воспроизводства их плодородия в адаптивно-ландшафтном земледелии: Т. 1. Теоретические и методические основы предотвращения деградации почв (земель) сельскохозяйственных угодий. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева Россельхозакадемии, 2013. 756 с.
25. *Неуструев С.С.* К вопросу о “нормальных” почвах и зональности комплекса сухих степей // Почвоведение. 1910. № 2. С. 177–190.
26. Общесоюзная инструкция по почвенным обследованиям и составлению крупномасштабных почвенных карт землепользования / Под ред. Ищенко Т.А. М.: Колос, 1973. 95 с.
27. Полевой определитель почв России. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 2008. 182 с.
28. *Потапов И.И., Сафронов И.Н.* Рельеф, геологическое строение и полезные ископаемые Северо-Кавказского экономического района. Ростов-на-Дону: Рост. ун-т, 1985. 156 с.
29. *Рейнгард Я.Р.* Деградация почв экосистем юга Западной Сибири. Лодзь, 2009. 636 с.
30. *Рейнгард Я.Р., Долгова Д.А., Аникин А.С., Долженко С.В.* Изменение структуры почвенного покрова в связи с развитием процессов эрозии и дефляции в южно-таёжной зоне Западной Сибири (на примере Омской области) // Омский научный вестник. 2012. № 2. С. 258–261. https://elibrary.ru/download/elibrary_18387776_65814340.pdf
31. *Рейнгард Я.Р., Долгова Д.А.* Формирование структуры почвенного покрова на территориях с грядными формами рельефа в лесостепной и степной зонах Омской области при развитии процессов эрозии и дефляции // Вестник Бурятской гос. с/х. академии им. В.Р. Филиппова. 2009. № 3. С. 55–59. https://elibrary.ru/download/elibrary_13013636_78414285.pdf
32. *Рейнгард Я.Р., Долженко С.В.* Формирование структуры почвенного покрова на Прииртышском увале Западной Сибири при развитии процессов эрозии и дефляции. Омск: ОмГАУ, 2006. 135 с.
33. Руководство по лабораторным методам исследования ионно-солевого состава нейтральных и щелочных минеральных почв / Под ред. Хитрова Н.Б., Понизовского А.А. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 1990. 236 с.
34. *Рулев А.С., Юферев В.Г., Юферев М.В.* Геоинформационные исследования эрозионной деградации в агроландшафтах // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса. 2013. № 2. С. 1–4. <https://cyberleninka.ru/article/n/geoinformatsionnye-issledovaniya-erozionnoy-degradatsii-v-agrolandshaftah>
35. *Рухович Д.И., Королева П.В., Вильчевская Е.В., Калинина Н.В.* Цифровая тематическая картография как смена доступных первоисточников и способов их использования // Цифровая почвенная картография: теоретические и экспериментальные исследования. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 2012. С. 58–86.
36. *Рухович Д.И., Королева П.В., Калинина Н.В., Вильчевская Е.В., Сулейман Г.И., Черноусенко Г.И.* Детектирование деградированных участков пашни на основе анализа больших спутниковых данных // Почвоведение. 2021. № 2. С. 151–167. <https://doi.org/10.31857/S0032180X21020131>
37. *Рухович Д.И., Рухович А.Д., Рухович Д.Д., Симакowa М.С., Куляница А.Л., Брызжев А.В., Королева П.В.* Информативность коэффициентов а и б линии почв для анализа материалов дистанционного зондирования // Почвоведение. 2016. № 8. С. 903–917. <https://doi.org/10.7868/S0032180X16080128>
38. *Рухович Д.И., Рухович А.Д., Рухович Д.Д., Симакowa М.С., Куляница А.Л., Брызжев А.В., Королева П.В.* Построение карт усредненных спектральных отклонений от линии почв и их сравнение с традиционными почвенными картами // Почвоведение. 2016. № 7. С. 794–812. <https://doi.org/10.7868/S0032180X1607008X>
39. *Силова В.А.* Анализ геоморфологических особенностей агроландшафтов Среднего Дона. Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. 2021. 1(61). 203–210. <https://doi.org/10.32786/2071-9485-2021-01-20>
40. *Синельникова К.П.* Геоинформационный анализ современного состояния агроландшафта Донской гряды // Научно-агрономический журнал. 2020. № 3. С. 9–16. <https://doi.org/10.34736/FNC.2020.110.3.002.9-16>
41. *Синельникова К.П.* Оценка состояния агроландшафтов Донской гряды с использованием ГИС-технологий и космоснимков // Успехи современного естествознания. 2022. № 6. С. 21–26. https://s.natural-sciences.ru/pdf/2022/2022_6.pdf
42. *Смирнова М.А., Жидкин А.П., Лозбенев Н.И., Заздравных Е.А., Козлов Д.Н.* Цифровое картографирование степени эродированности почв с использованием моделей фактор-свойство и фактор-процесс-свойство (юг Среднерусской возвышенности) // Бюл. Почв. ин-та. 2020. Вып. 104. С. 158–198. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-104-158-198>
43. *Соболев С.С.* Развитие эрозионных процессов на территории европейской части СССР и борьба с ними. М.—Л.: Изд-во АН СССР, 1948. Т. 1. 305 с. Т. 2. 1960. 248 с.
44. *Сорокина Н.П.* Методология составления крупномасштабных агроэкологически ориентированных почвенных карт. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 2006. 159 с.

45. Сурмач Г.П. Рельефообразование, формирование лесостепи, современная эрозия и противоэрозийные мероприятия. Волгоград: ВНИАЛМИ, 1992. 174 с.
46. Сухановский Ю.П. Модель дождевой эрозии // Почвоведение. 2010. № 9. С. 1114–1125.
47. Фишман М.И. Черноземные комплексы и их связь с рельефом на Среднерусской возвышенности // Почвоведение. 1977. № 5. С. 17–30.
48. Фомичева Д.В., Лозбенев Н.И. Моделирование эрозионных структур почвенного покрова (на примере южного склона Клинско-Дмитровской гряды) // Антропогенная трансформация природной среды. 2018. № 4. С. 200–202. <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-erozionnyh-struktur-pochvennogo-pokrova-na-primere-yuzhnogo-sk-lona-klinsko-dmitrovskoy-gryady> (дата обращения: 13.02.2023).
49. Фридланд В.М. Структура почвенного покрова. М.: Мысль, 1972.
50. Хитров Н.Б., Герасимова М.И. Диагностические горизонты в классификации почв России: версия 2021 // Почвоведение. 2021. № 8. С. 899–910. <https://doi.org/10.31857/S0032180X21080098>
51. 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>
52. Хитров Н.Б., Калинина Н.В., Роговнева Л.В., Рухович Д.И. Слитоземы и слитизированные почвы России. М.: ИД Академии Жуковского, 2020. 516 с. ISBN: 978-5-907275-35-5
53. Юферев В.Г., Юферев М.В. Оценка эрозионного состояния агроландшафтов по космоснимкам // Научно-агрономический журнал. 2018. С. 26–28. <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-erozionnogo-sostoyaniya-agrolandshaftov-po-kosmosnimkam>
54. Швец Г.И. Формирование водной эрозии, стока наносов и их оценка (на примере Украины и Молдавии). Л.: Гидрометеиздат, 1974. 184 с.
55. Abdulkareem J.H., Pradhan B., Sulaiman W.N.A., Jamil N.R. Prediction of spatial soil loss impacted by long-term land-use/land-cover change in a tropical watershed // Geoscience Frontier. 2019. V. 10. № 2. P. 389–403. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2017.10.010>
56. Alatorre L.C., Beguería S., García-Ruiz J.M. Regional scale modeling of hillslope sediment delivery: a case study in Barasona reservoir watershed (Spain) using WATEM/SEDEM // J. Hydrol. 2010. V. 391. P. 109–123. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.07.010>
57. Alatorre L.C., Beguería S., Lana-Renault N., Navas A., García-Ruiz J.M. Soil erosion and sediment delivery in a mountain catchment under scenarios of land use change using a spatially distributed numerical model // Hydrology and Earth System Sciences. 2012. V. 16. P. 1321–1334. <https://doi.org/10.5194/hess-16-1321-2012>
58. Alexakis D.D., Manoudakis S., Agapiou A., Polykretis C. Towards the Assessment of Soil-Erosion-Related C-Factor on European Scale Using Google Earth Engine and Sentinel-2 Images // Remote Sensing. 2021. V. 13. P. 5019. <https://doi.org/10.3390/rs13245019>
59. Amasi A.I.M., Wynants M., Kawala R.A., Sawe S.F., Blake W.H., Mtei K.M. Evaluating Soil Carbon as a Proxy for Erosion Risk in the Spatio-Temporal Complex Hydropower Catchment in Upper Pangani, Northern Tanzania // Earth. 2021. V. 2. P. 764–780. <https://doi.org/10.3390/earth2040045>
60. Ayalew D.A., Deumlich D., Šarapatka B., Doktor D. Quantifying the sensitivity of NDVI-Based C factor estimation and potential soil erosion prediction using Spaceborne earth observation data // Remote Sensing. 2020. V. 12. P. 1136. <https://doi.org/10.3390/rs12071136>
61. Bagarello V., Di Stefano C., Ferro V., Pampalone V. Predicting maximum annual values of event soil loss by USLE-type models // Catena. 2017. V. 155. P. 10–19. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.03.002>
62. Batista P.V.G., Lacey J.P., Davies J., Carvalho T.S., Tassinari D., Silva M.L.N., Curi N., Quinton J.N. A framework for testing large-scale distributed soil erosion and sediment delivery models: Dealing with uncertainty in models and the observational data // Environmental Modelling and Software. 2021. V. 137. P. 104961. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2021.104961>
63. Benavidez R., Jackson B., Maxwell D., Norton K. A review of the (Revised) universal soil loss equation ((R) USLE): With a view to increasing its global applicability and improving soil loss estimates // Hydrology and Earth System Sciences. 2018. V. 22. № 11. P. 6059–6086. <https://doi.org/10.5194/hess-22-6059-2018>
64. Buryak Z.A., Ukrainsky P.A., Gusarov A.V., Lukin S.V., Beylich A.A. Geomorphic factors influencing the spatial distribution of eroded Chernozems in automated digital soil erosion mapping // Geomorphology. 2023. V. 439. P. 108863. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2023.108863>
65. De Carvalho D.F., Durigon V.L., Antunes M.A.H., De Almeida W.S., Oliveira P.T.S. Predicting soil erosion using Rusle and NDVI time series from TM Landsat 5 // Pesquisa Agropecuária Brasileira. 2014. V. 49. № 3. P. 215–224. <https://doi.org/10.1590/s0100-204X2014000300008>
66. Eckert S., Hüsler F., Liniger H., Hodel E. Trend analysis of MODIS NDVI time series for detecting land

- degradation and regeneration in Mongolia // *J. Arid Environ.* 2015. V. 113. P. 16–28.
<https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2014.09.001>
67. *Eltner A., Baumgart P., Maas H.G., Faust D.* Multi-temporal UAV data for automatic measurement of rill and interrill erosion on loess soil // *Earth Surface Processes and Landforms*. 2015. V. 40. № 6. P. 741–755.
<https://doi.org/10.1002/esp.3673>
 68. Farm Management. Satellite Big Data: how it is changing the face of precision farming. Available online: <http://www.farmmanagement.pro/satellite-big-data-how-it-is-changing-the-face-of-precision-farming/>
 69. *Felix F.C., Cândido B.M., de Moraes J.F.L.* Improving RUSLE predictions through UAV-based soil cover management factor (C) assessments: A novel approach for enhanced erosion analysis in sugarcane fields // *J. Hydrology*. 2023. V. 626. P. 130229.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.130229>
 70. *Feng X., Wang Y., Chen L., Fu B., Bai G.* Modeling soil erosion and its response to land-use change in hilly catchments Chinese Loess Plateau // *Geomorphology*. 2010. V. 118. № 3–4. P. 239–248.
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.01.004>
 71. *Fu B.J., Zhao W.W., Chen L.D., Zhang Q.J., Lü Y.H., Gulnick H., Poesen J.* Assessment of soil erosion at large watershed scale using RUSLE and GIS: a case study in the Loess Plateau of China // *Land Degradation and Development*. 2005. V. 16. № 1. P. 73–85.
<https://doi.org/10.1002/ldr.646>
 72. *Higginbottom T.P., Symeonakis E.* Assessing land degradation and desertification using vegetation index data: current frameworks and future directions // *Remote Sensing*. 2014. V. 6. P. 9552–9575.
<https://doi.org/10.3390/rs6109552>
 73. *Huang Y., Chen Z.-X., Yu T., Huang X.-Z., Gu X.-F.* Agricultural remote sensing big data: Management and applications // *J. Integrative Agriculture*. 2018. V. 17. P. 1915–1931, doi:10.1016/s2095-3119(17)61859-8
 74. *Ibrahim Y.Z., Balzter H., Kaduk J., Tucker C.J.* Land degradation assessment using residual trend analysis of GIMMS NDVI3g, soil moisture and rainfall in sub-Saharan west Africa from 1982 to 2012 // *Remote Sensing*. 2015. V. 7. P. 5471–5494.
<https://doi.org/10.3390/rs70505471>
 75. 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 № 106. FAO, Rome. 192 p.
 76. *Iwahashi Y., Ye R., Kobayashi S., Yagura K., Hor S., Soben K., Homma K.* Quantification of changes in rice production for 2003–2019 with MODIS LAI data in Pursat Province, Cambodia // *Remote Sensing*. 2021. V. 13. P. 1971.
<https://doi.org/10.3390/rs13101971>
 77. *Khitrov N.B., Gorokhova I.N., Kravchenko E.I.* Statistics on the Variation in Depth and Thickness of Soil Cover Horizons at the Oroschaemaya Experimental Station // *Moscow University Soil Sci. Bull.* 2022. V. 77. № 2. P. 83–93.
<https://doi.org/10.3103/S0147687422020028>
 78. *Khitrov N.B., Rukhovich D.I., Koroleva P.V., Kalinina N.V., Trubnikov A.V., Petukhov D.A., Kulyanitsa A.L.* A study of the responsiveness of crops to fertilizers by zones of stable intra-field heterogeneity based on big satellite data analysis // *Archives of Agronomy and Soil Science*. 2020. V. 66. № 14. P. 1963–1975.
<https://doi.org/10.1080/03650340.2019.1703957>
 79. *Li H., Shi D.* Spatio-temporal variation in soil erosion on sloping farmland based on the integrated valuation of ecosystem services and trade-offs model: A case study of Chongqing, southwest China // *Catena*. 2024. V. 236. P. 107693.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107693>
 80. *Lozbenov N., Komissarov M., Zhidkin A., Gusarov A., Fomicheva D.* Comparative assessment of digital and conventional soil mapping: a case study of the Southern Cis-Ural region, Russia // *Soil Systems*. 2022. V. 6. P. 1–12.
<https://doi.org/10.3390/soilsystems6010014>
 81. *Meinen B.U., Robinson D.T.* Mapping erosion and deposition in an agricultural landscape: Optimization of UAV image acquisition schemes for SfM-MVS // *Remote Sensing of Environment*. 2020. V. 239. P. 111666.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111666>
 82. *Mendonça-Santos M.D.L., Dart R.O., Santos H.G., Coelho M.R., Barbara R.L.L., Lumbieras J.F.* Digital soil mapping of topsoil organic carbon content of Rio de Janeiro state, Brazil // *Digital Soil Mapping*. Eds.: Boettinger J.L et al. N.Y.: Springer, 2010. Pp. 255–266.
https://doi.org/10.1007/978-90-481-8863-5_21
 83. *Mokarram M., Zarei A.R.* Soil erosion prediction using Markov and CA-Markov chains methods and remote sensing drought indicators // *Ecological Informatics*. 2023. V. 78. P. 102386.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2023.102386>
 84. *Musasa T., Dube T., Marambanyika T.* Landsat satellite programme potential for soil erosion assessment and monitoring in arid environments: A review of applications and challenges // *Int. Soil Water Conserv. Res.* 2024. V. 10. P. 003.
<https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2023.10.003>
 85. *Phinzi K., Ngetar N.S.* Mapping soil erosion in a quaternary catchment in Eastern Cape using geographic information system and remote sensing // *South African J. Geomatics*. 2017. V. 6. № 1. P. 11–29.
<https://doi.org/10.4314/sajg.v6i1.2>
 86. *Pineux N., Lisein J., Swerts G., Bielders C.L., Lejeune P., Colinet G., Degré A.* Can DEM time series produced by UAV be used to quantify diffuse erosion

- in an agricultural watershed? // *Geomorphology*. 2017. V. 280. P. 122–136.
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.12.003>
87. Qi G., Chang C., Yang W., Gao P., Zhao G. Soil salinity inversion in coastal corn planting areas by the satellite-UAV-ground integration approach // *Remote Sens.* 2021. V. 13. № 16. P. 3100.
<https://doi.org/10.3390/rs13163100>
 88. Renard K.G., Foster G.R., Weesies G.A., McCool D.K., Yoder D.C. Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). USDA Agriculture Handbook 703, 1997. 40 p.
 89. Romanenkov V., Smith J., Smith P., Sirotenko O.D., Rukhovitch D.I., Romanenko I.A. Soil organic carbon dynamics of croplands in European Russia: estimates from the “model of humus balance” // *Reg. Environ. Chang.* 2007. V. 7. P. 93–104.
<https://doi.org/10.1007/s10113-007-0031-7>
 90. Romano E., Bergonzoli S., Pecorella I., Bisaglia C., De Vita P. Methodology for the definition of durum wheat yield homogeneous zones by using satellite spectral indices // *Remote Sensing*. 2021. V. 13. № 11. P. 2036.
<https://doi.org/10.3390/rs13112036>
 91. Rukhovitch D.I., Koroleva P.V., Rukhovitch D.D., Kalinina N.V. The use of deep machine learning for the automated selection of remote sensing data for the determination of areas of arable land degradation processes distribution // *Remote Sensing*. 2021. V. 13. № 1. P. 155.
<https://doi.org/10.3390/rs13010155>
 92. Rukhovitch D.I., Koroleva P.V., Rukhovitch A.D., Komissarov M.A. Informativeness of the Long-Term Average Spectral Characteristics of the Bare Soil Surface for the Detection of Soil Cover Degradation with the Neural Network Filtering of Remote Sensing Data // *Remote Sensing*. 2023. V. 15. № 1. P. 124.
<https://doi.org/10.3390/rs15010124>
 93. Rukhovitch D.I., Koroleva P.V., Rukhovitch A.D., Komissarov M.A. Updating of the Archival Large-Scale Soil Map Based on the Multitemporal Spectral Characteristics of the Bare Soil Surface Landsat Scenes // *Remote Sensing*. 2023. V. 15. № 18. P. 4491.
<https://doi.org/10.3390/rs15184491>
 94. Rukhovitch D.I., Koroleva P.V., Vilchevskaya E.V., Romanenkov V., Kolesnikova L.G. Constructing a spatially-resolved database for modelling soil organic carbon stocks of croplands in European Russia // *Reg. Environ. Chang.* 2007. V. 7. P. 51–61.
<https://doi.org/10.1007/s10113-007-0029-1>
 95. Schmalitz E.M., Johannsen L.L., Thorsøe M.H., Tähtikarhu M., Räsänen T.A., Darboux F., Strauss P. Connectivity elements and mitigation measures in policy-relevant soil erosion models: A survey across Europe // *Catena*. 2024. V. 234. P. 107600.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107600>
 96. Senanayake S., Pradhan B., Wedathanthirige H., Alami A., Park H.-J. Monitoring soil erosion in support of achieving SDGs: A special focus on rainfall variation and farming systems vulnerability // *Catena*. 2024. V. 234. P. 107537.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107537>
 97. Shary P.A., Sharaya L.S., Mitusov A.V. Fundamental quantitative methods of land surface analysis // *Geoderma*. 2002. V. 107. P. 1–32.
[https://doi.org/10.1016/s0016-7061\(01\)00136-7](https://doi.org/10.1016/s0016-7061(01)00136-7)
 98. SRTM. Available online: <http://srtm.csi.cgiar.org>
 99. Xu H., Hu X., Guan H., Zhang B., Wang M., Chen S., Chen M. A remote sensing based method to detect soil erosion in forests // *Remote Sensing*. 2019. V. 11. P. 513.
<https://doi.org/10.3390/rs11050513>
 100. Yengoh G.T., Dent D., Olsson L., Tengberg A.E., Tucker C.J. Limits to the use of NDVI in land degradation assessment // *Use of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) to Assess Land Degradation at Multiple Scales*. Springer Briefs in Environmental Science. Springer: Cham, Switzerland, 2015. P. 27–30.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-24112-8_4
 101. Zhang Y., Walker J.P., Pauwels V.R.N., Sadeh Y. Assimilation of wheat and soil states into the AP-SIM-wheat crop model: a case study // *Remote Sensing*. 2022. V. 14. № 1. Paper 65. P. 1–21.
<https://doi.org/10.3390/rs14010065>
 102. Zhidkin A., Fomicheva D., Ivanova N., Dost'al T., Yurova A., Komissarov M., Kr'asa J. A detailed reconstruction of changes in the factors and parameters of soil erosion over the past 250 years in the forest zone of European Russia (Moscow region) // *Int. Soil Water Conserv. Res.* 2022. V. 10. № 1. P. 149–160.
<https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2021.06.003>
 103. Zhidkin A., Gennadiev A., Fomicheva D., Shamshurina E., Golosov V. Soil erosion models verification in a small catchment for different time windows with changing cropland boundary. // *Geoderma*. 2023. V. 430. P. 116322.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.116322>

Erosion-Accumulative Soil Cover Pattern of Dry-Steppe Agricultural Landscape, Rostov Region

N. B. Khitrov^{1, *}, E. I. Kravchenko¹, D. I. Rukhovich¹, and P. V. Koroleva¹

¹Dokuchaev Soil Science Institute, Moscow, 119017 Russia

**e-mail: khitrovn@gmail.com*

The aim of the work is to present the results of a ground-based study of the erosion-accumulative soil cover pattern of a key area and to assess the information content of multi-temporal remote sensing data of the bare soil surface for its identification and mapping in the zone of distribution of dark chestnut soils (Kastanozems). The study area is located on the Millerovo-Morozovskaya inclined plain within the Don-Donetsk hilly-ridge plain in the Oblivsky district of the Rostov region. The soil cover of the key area is represented by a combination of different variations of low-contrast soils on convex and concave surfaces within an elongated ridge and its slopes, including agro-dark chestnut solonetzic and non-solonetzic soils, agrozems (eroded soils that have lost the xerometamorphic horizon), stratozems (heavily delivered soils). The formation of the soil cover pattern is determined by a combination of mesorelief forms and two types of parent material. The C coefficient map of the multi-temporal soil line reveals the heterogeneity of the soil cover due to erosion-accumulative processes. In study area, three contrasting soil combinations are confidently distinguished in the form of different variations and combination-variations, forming a kind of framework of the soil cover pattern. Soil combinations of eroded and delivered soils located between the above three groups of soil combinations are significantly different from their neighbors, but their interpretation has increased uncertainty.

Keywords: Kastanozems, stratozems, eroded soils, vertic soils, bare soil surface, spectral neighborhood of the soil line, multi-temporal soil line