

ВЫДЕЛЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНО-КАРБОНАТНЫХ ПОЧВ И ДИАГНОСТИКА ПОЧВ НА ПЕСТРЫХ ПОДСТИЛАЮЩИХ ПОРОДАХ ЮГА ПРИВОЛЖСКОЙ ВОЗВЫШЕННОСТИ С ПОМОЩЬЮ ОБРАБОТКИ КОСМИЧЕСКОГО СНИМКА

© 2024 г. И. Н. Горохова^{a,*}, Н. Б. Хитров^a (<https://orcid.org/000-0001-5151-5109>), Л. А. Тарнопольский^b

^aПочвенный институт им. В.В. Докучаева, Пыжевский пер., 7, стр. 2, Москва, 119017 Россия

^bНаучный геоинформационный центр РАН, ул. Новый Арбат, 11, Москва, 119019 Россия

*e-mail: g-irina14@yandex.ru

Поступила в редакцию 09.01.2024 г.

После доработки 19.02.2024 г.

Принята к публикации 27.02.2024 г.

Цель работы — установить связи между спектральными характеристиками открытой поверхности почвы на снимке Pleiades (25.04.2020) и почвами на ключевом участке со сложной структурой почвенного покрова на территории южной части Приволжской возвышенности Волго-Донской оросительной системы, Волгоградская область. Территория характеризуется высокой литологической неоднородностью: палеогеновые и неогеновые пески и суглинки перекрыты чехлом четвертичных бурых суглинков переменной мощности от 1–2 м до полного выклинивания. Почвенный покров представлен светло-каштановыми солонцовыми комплексами, осложненными мозаикой литологических вариантов и эрозийно-аккумулятивными сочетаниями. На основе цифровых методов обработки спектральных характеристик космического снимка и использования наземной информации о почвах выделено восемь групп почв и построена карта их распространения на ключевом участке площадью 343 га. Группы почв различаются по общим особенностям поверхности почвы, обусловленным наличием и количеством щебня и камней, гранулометрическим составом поверхностного горизонта (от песка до среднего суглинка), наличием осветленных корочек на поверхности, наличием или отсутствием вскипания от HCl с поверхности в зависимости от мощности первого литологического слоя. Внутри отдельных групп объединены почвы с разным строением профиля (агрокаштановые, агроземы, агросолонцы). Почвы одного типа и иногда подтипа попадают в разные группы по спектральным характеристикам. Это обусловлено неполным соответствием свойств поверхности почвы, которые влияют на спектральные характеристики, и внутреннего строения почвенного профиля в целом.

Ключевые слова: спектральная яркость, каменистые почвы, песчаные почвы, вскипающие с поверхности почвы, пестрые суглинки, агрокаштановые почвы, агросолонцы

DOI: 10.31857/S0032180X24080016, **EDN:** KNVXRQ

ВВЕДЕНИЕ

Волгоградская область является одним из крупнейших производителей сельскохозяйственной продукции в Российской Федерации. В структуре сельского хозяйства здесь более 65% приходится на продукцию растениеводства. Основные массивы сельскохозяйственных угодий установились в начале 1960-х гг. после освоения целинных и залежных земель и широкого развития орошения. В настоящее время по данным [11] общая площадь

пахотных земель в области на 01.01.2021 г. составила 5794 тыс. га, из которых около 179 тыс. га орошается.

Для оценки плодородия почв, в том числе орошаемых, необходимо иметь представление о свойствах, определяющих и ограничивающих их плодородие. К числу свойств, ограничивающих плодородие почв, относятся каменистость, щебнистость, песчанистость и карбонатность почв. В настоящее время работы по выявлению таких

почв на сельскохозяйственных угодьях осуществляют с помощью дистанционной информации. Однако интерпретация дистанционных материалов требует обязательного изучения особенностей района исследований на основе полевых работ и лабораторных анализов. Такие работы важны для подтверждения выявленных почв и обоснования выбранного метода обработки космических материалов.

Ранее [6] рассмотрена возможность выделения каменистых, щебнистых и песчаных почвообразующих и подстилающих пород, а также поверхностно-карбонатных почв на орошаемых полях по яркости их изображения на космических снимках. Выявлено, что неоднородность орошаемых полей на снимках отражает как наличие карбонатных пятен, так и расположение на поверхности или близко к поверхности пестрых подстилающих и почвообразующих пород. Между группами таких пятен существуют яркостные различия, что позволяет разделить их. Как продолжение исследований в настоящей работе рассматриваются результаты классификации космического снимка по выделению поверхностно-карбонатных почв и почв, сформированных на пестрых отложениях.

Впервые на миграцию карбонатов в орошаемых почвах обратили внимание волгоградские ученые [4]. Пятнистость на полях, связанную с карбонатами на поверхности орошаемых почв, отмечал и автор [12]. Выделение поверхностно-карбонатных почв по дистанционным материалам рассмотрено в работе [7].

Подстилающие и почвообразующие породы изучались исследователями главным образом по материалам гиперспектральной космической съемки, которая позволила по спектральной яркости в определенных каналах выделять различные глины, крупный песок и супесь [37, 41]. Гиперспектральное дистанционное зондирование обладает высоким спектральным разрешением, что позволяет обнаруживать спектральные свойства многих минералов. Недостатком съемки является ее сложность, когда трудно разобраться в излишних массивах данных. Также гиперспектральная космическая съемка имеет низкое пространственное разрешение (30 м). Иногда, чтобы улучшить ее пространственное разрешение, используется метод объединения изображений, когда информацию из гиперспектральных данных низкого разрешения объединяют с мультиспектральными данными высокого разрешения или панхроматическим изображением той же сцены. Этот подход известен как панорамирование [45]. Однако гиперспектральная съемка и в этом случае недостаточна для изучения почвообразующих и подстилающих пород в пределах поля или нескольких отдельных полей.

Цель работы — выделение каменистых, щебнистых, песчаных и вскипающих с поверхности почв на участке с высокой литологической неоднородностью почвообразующих и подстилающих пород путем классификации мультиспектрального космического изображения сверхвысокого разрешения (Pleiades, 0.6 м) в комплексе с полевыми исследованиями на юге Приволжской возвышенности.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объектом изучения стала Волго-Донская оросительная система (ОС), расположенная на юге Приволжской возвышенности в Волгоградской области. Ключевой участок исследования находится в границах ФГБУ “Опытная станция “Орошаемая”, которая занимает центральную часть Волго-Донской ОС (рис. 1).

Приволжская возвышенность представляет собой слабовыпуклое плато с высотами 100–170 м, рассеянное многочисленными речными долинами, оврагами и балками.

Основными почвообразующими породами юга Приволжской возвышенности являются палеогеновые (эоцен и палеоцен) кварцевые пески, неогеновые (ергенинская свита) пески, скифские красно-бурые глины и четвертичные лёссовидные суглинки.

Юг Приволжской возвышенности входит в подзону каштановых почв. Почвенный покров представлен почвенными комбинациями, включающими светло-каштановые несолонцеватые почвы на водораздельных пространствах, светло-каштановые солонцовые комплексы с разным долевым участием солонцов в автоморфных, полугидроморфных и гидроморфных условиях, сочетания и пятнистости лугово-каштановых, луговых почв разной степени засоления и солонцеватости, аллювиальные почвы в долинах рек [5, 10, 13].

Ключевой участок исследования расположен на правом крутом берегу балки Песчаная и охватывает несколько полей, для которых характерны каменистость и щебнистость, выходы песков, песчаные, супесчаные и суглинистые почвообразующие и подстилающие породы. В результате антропогенного воздействия (вспашка, орошение) и эрозионного смыва здесь широко распространены вскипающие с поверхности карбонатные почвы.

В сентябре–августе 2022 г. проводили полевые обследования ключевого участка. Заложили 3 почвенно-топографических профиля с описанием почв и почвообразующих пород и 27 разрезов и прикопок.

При полевом обследовании использовали руководство по морфологическому описанию почв [23], название почв давали по трем классификациям: СССР [16] (далее К-1977), России [15, 20, 27, 28]

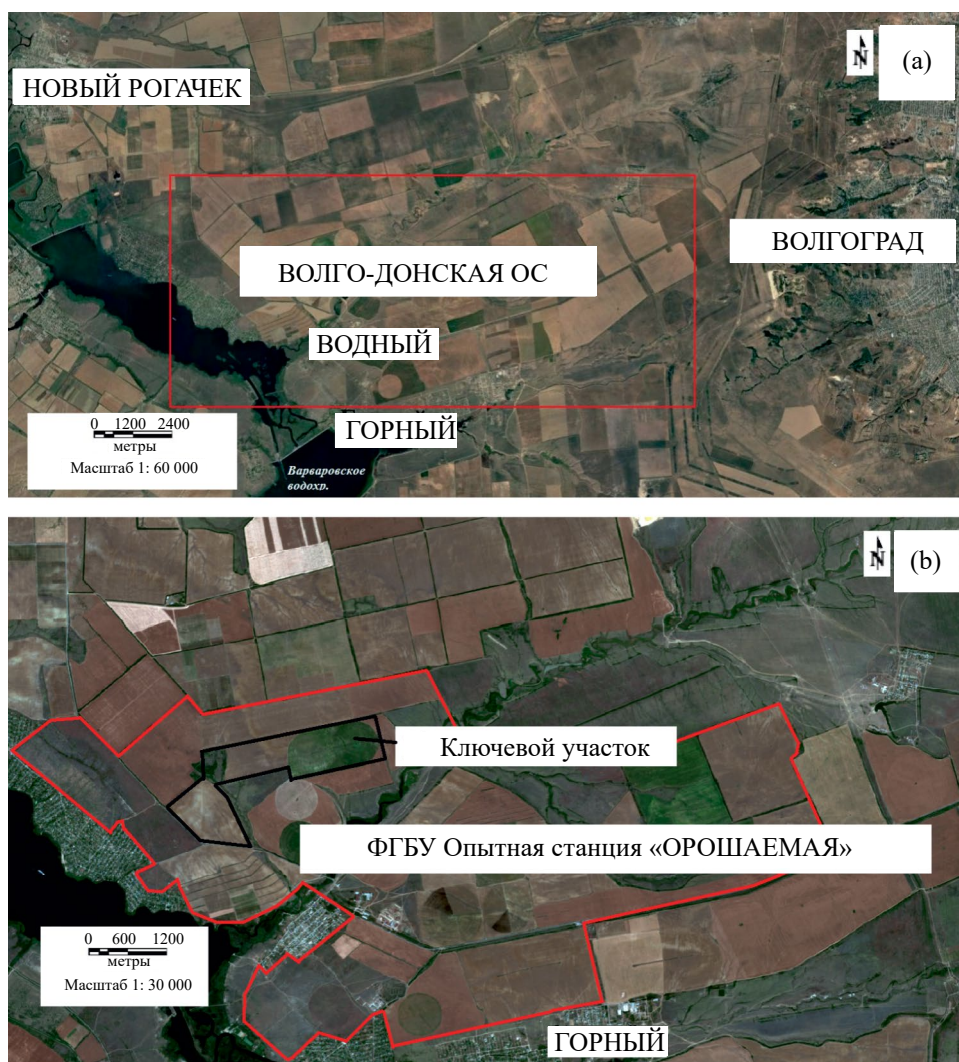


Рис. 1. Расположение Волго-Донской ОС, отображенное на космическом снимке с портала Google Earth (Pleiades, 25.05.2021) (а); территория ФГБУ «Опытная станция «Орошаемая» и ключевой участок исследований на космическом снимке (Sentinel-2, 28.06.2020) (б).

(далее РК-2004) и международной WRB [36] (далее WRB-2015).

В камеральных условиях после анализа полученного материала выявлены визуальные и спектральные различия на космическом снимке Pleiades (25.04.2020) с разрешением 0.5–0.7 м каменистых, щебнистых и песчаных почв и их отличие от поверхностно-вскипаяющих почв. Была составлена таблица спектральных диапазонов исследуемой группы почв, которая представлена работе [6]. Спектральную яркость определяли с помощью скользящего окна диаметром 15 м (точность привязки на местности GPS–приемника) в 4 каналах: синем, В1 (0.43–0.55 мкм), зеленом, В2 (0.49–0.61 мкм), красном, В3 (0.60–0.72 мкм), ближнем инфракрасном, В4 (0.79–0.95 мкм).

Опираясь на составленную таблицу в программе Random Forest, провели классификацию космического изображения ключевого участка с выделением 8 классов. Полученную статистическую модель оценивали по следующим параметрам [35]:

1. Матрица ошибок, как правило, используется для классификации несбалансированного набора данных. Матрица сравнивает фактические значения с прогнозными, предсказанными моделью машинного обучения. В матрице ошибок на диагонали отмечается количество правильно отнесенных пикселей к выделенным классам, т.е. где прогнозные значения соответствуют фактическим значениям. Все, что расположено выше, это ложно-положительные результаты, а ниже — ложно-негативные.

Из матрицы на рис. 2 видно, что из набора данных контрольной выборки для всего ключевого

Матрица ошибок

Истинные значения	1	31	0	0	1	0	0	0	0
	2	0	21	0	0	0	0	0	0
	3	0	0	101	0	0	0	0	0
	4	0	0	0	126	0	0	0	0
	5	0	0	3	0	132	2	4	3
	6	0	0	0	0	3	94	3	2
	7	0	0	0	0	2	2	141	4
	8	0	0	0	0	0	2	11	193
		0	2	3	4	5	6	7	8
Предсказанные значения									

Рис. 2. Матрица ошибок классифицированного изображения почв (8 классов) по космическому снимку высокого разрешения Pleiades, 25.04.2020, в пикселах (контрольная выборка).

участка с открытой поверхностью почв классы правильно идентифицируются (0.91–0.97) практически во всех случаях.

2. Кросс-валидация — способ оценки модели, который предусматривает применение скользящего контроля или перекрестной проверки. В этом случае фиксируется некоторое множество разбиений исходной выборки на две подвыборки: обучающую и контрольную. Для каждого разбиения выполняется настройка алгоритма по обучающей подвыборке, затем оценивается его средняя ошибка на объектах контрольной подвыборки. Оценкой скользящего контроля называется средняя по всем разбиениям величина ошибки на контрольных подвыборках. В настоящем случае при применении алгоритма треть выборки оставляли для тестирования, которая не участвовала в обучении. Точность классификации по тестовому набору данных (30% от общего набора) составила 0.94.

3. Точность — это доля правильных ответов модели в пределах класса относительно всех объектов, которые система отнесла к этому классу.

4. Полнота — это доля истинно положительных классификаций (где прогнозные значения соответствуют фактическим значениям). Полнота показывает, какую долю объектов, реально относящихся к положительному классу, модель предсказывает верно.

5. F-мера. В реальной жизни максимальная точность и полнота недостижимы одновременно и

Таблица 1. Статистические показатели классификации изображения почв, 8 классов с использованием алгоритма Random Forest по космическому снимку Pleiades (25.04.2020) (контрольная выборка)

Класс/параметр (метрика)	Точность	Полнота	F-мера	Выборка
1	1.00	0.97	0.98	32
2	1.00	1.00	1.00	21
3	0.96	0.99	0.98	102
4	0.99	1.00	1.00	126
5	0.92	0.92	0.92	144
6	0.94	0.92	0.93	102
7	0.89	0.95	0.92	149
8	0.95	0.91	0.93	213
Доля правильных ответов	—	—	0.94	889

приходится искать некий баланс между ними. Необходим параметр, который объединял бы в себе информацию о точности и полноте алгоритма. Именно такой метрикой является F-мера, которая не зависит от соотношения классов и потому применима в условиях несбалансированных выборок. F-мера представляет собой гармоническое среднее между точностью и полнотой. Она стремится к нулю, если точность или полнота стремятся к нулю.

Все показатели (метрики) классификации контрольной выборки, состоящей из пикселей на снимке, соответствующие классам почв на ключевом участке, представлены в табл. 1.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

На рис. 3 представлены результаты классификации космического снимка высокого разрешения (Pleiades, 25.04.2020), на котором отражены 8 групп почв на территории ключевого участка площадью 343 га. Нумерация групп проведена от объектов с наибольшей спектральной яркостью (наиболее светлых) до таковых с наименьшей яркостью (наиболее темных). Перечисление почв с указанием их строения выполнено по группам, хотя доля площади, занимаемая каждой группой, изменяется в обратном порядке: наиболее светлые с поверхности почвы группы 1 встречаются реже всего, а почвы группы 8 с наименьшей спектральной яркостью являются фоновыми, занимая около трети всей территории. Признаки почв, которые оказали

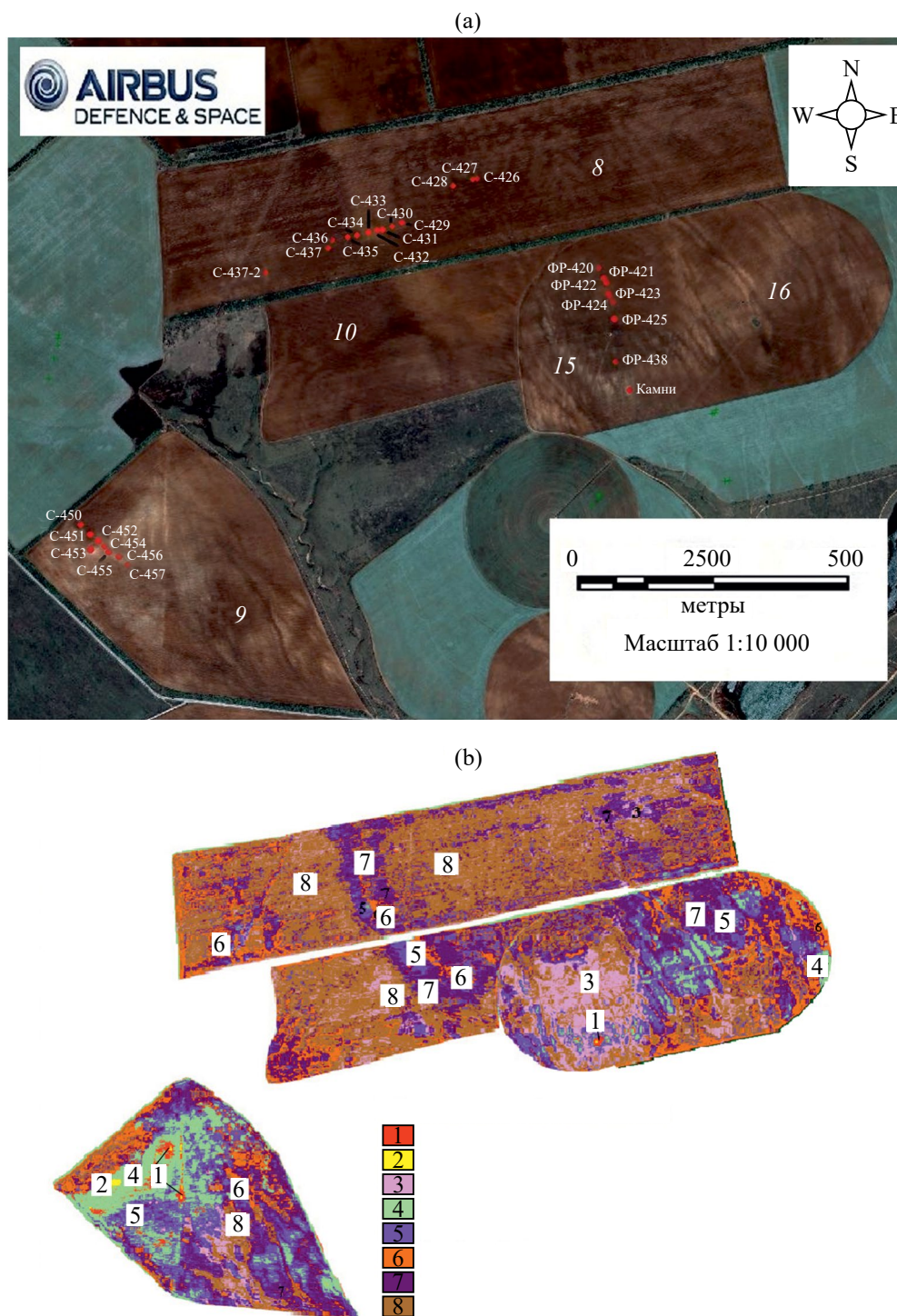


Рис. 3. Ключевой участок исследований и точки полевого опробования (2022 г.) на космическом снимке со спутника Pleiades (25.04.2020) (a) (на снимке крупным курсивом указаны номера полей, буквенными и цифровыми значениями — номера точек опробования); результат классификации космического изображения на 8 классов (b): 1 — каменистые с поверхности почвы; 2 — песчаные очень слабо каменистые с поверхности почвы, не имеющие вскипания от HCl; 3 — очень слабо каменистые агросолонцы с осветленными корочками на поверхности, не имеющими вскипания; 4 — очень слабо каменистые супесчаные почвы, не вскипающие с поверхности; 5 — очень слабо каменистые вскипающие с поверхности почвы на двучленных отложениях с мощностью первого литологического слоя суглинков около полуметра; 6 — очень слабо каменистые не вскипающие с поверхности почвы на двучленных отложениях с мощностью первого литологического слоя суглинков около полуметра; 7 — вскипающие с поверхности почвы на палево-бурых суглинках, имеющих мощность 70 см и больше; 8 — не вскипающие с поверхности почвы на палево-бурых суглинках, имеющих мощность 70 см и больше.

влияние на спектральную яркость и способствовали выделению восьми групп почв, систематизированы в виде схемы (рис. 4).

Самая высокая спектральная яркость характерна для группы 1 и чуть ниже для группы 2 почв. Они занимают самые маленькие по площади ареалы, которые составляют 1.61 (0.5%) и 0.43 га (0.1%) соответственно.

Почвы группы 1 выделяются скоплениями плоского карбонатного щебня на поверхности. Щебень светлый, его размеры 2–10 см, обилие 100–300 шт./м². Почва – агрозем карбонатный сильно-щебнистый на щебнисто-суглинистых отложениях с профилем Pca,sk'''–Cca,sk''' (пахотная неполно-развитая поверхностно-сильнокаменистая почва по К-1977; Calcaric Skeletic Leptosol (Aric, Loamic) по WRB-2015).

Почвы группы 2 приурочены к выходам на поверхность песков, содержащих мелкие силикатные камешки (размер до 2 см, обилие 1–2 шт./м²). Почва – агрозем псевдофибровый песчаный на слабокаменистых разноцветных песках с профилем P1sk'–P2ff,sk'–BC1sk'–2BC2–3D–4D2 (сильно-мытая пахотная песчаная на слабокаменистых песках по К-1977; Lamellic Arenosol (Aric, Ochric) по WRB-2015).

Общая площадь почв группы 3 составляет 27.8 га, или 8.1%. Группа 3 состоит из очень слабо каменистых не вскипающих с поверхности агросолонцов на двучленных отложениях с подстиланием с 50 см зелеными глауконитовыми суглинками и вскипающих с поверхности также очень слабо каменистых агроземов солонцеватых на зеленых суглинках.

Особенностями поверхности солонцовых почв этой группы являются, во-первых, наличие редких

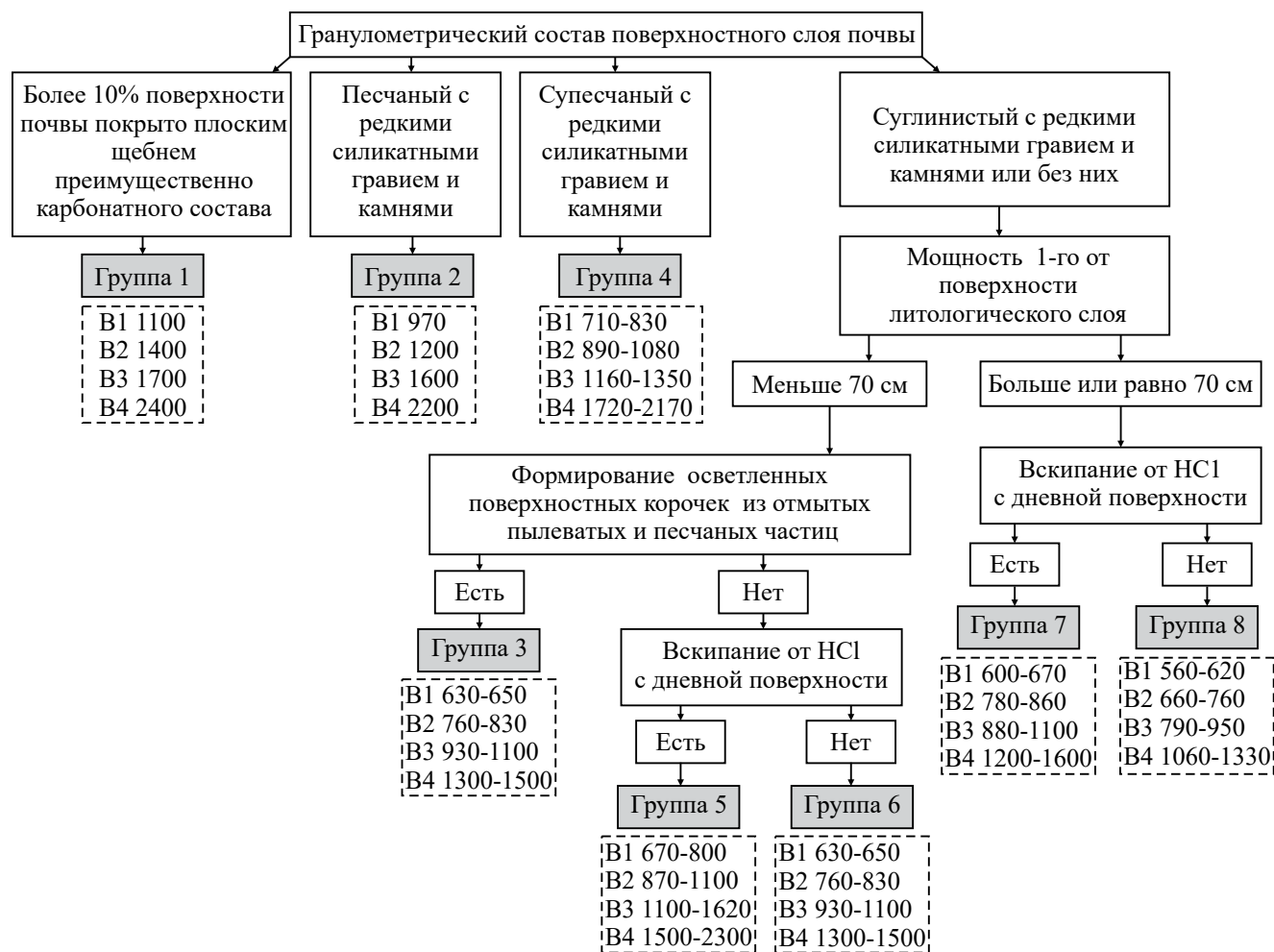


Рис. 4. Схема признаков почв, влияющих на спектральную яркость космического снимка (Pleiades, 25.04.2020). В пунктирных рамках указаны интервалы средней спектральной яркости в четырех каналах для нескольких точек опробования в каждой группе почв (группы 4–8) и безинтервальные значения для одной точки опробования (группы 1–2).

камней размером 2–5 см (редко до 10 см) и обилие от 3 до 20 шт./м², во-вторых, сетка трещин, разбивающих почвенную массу на блоки диаметром 10–15 см между узкими (0.5–1 см) трещинами и до 40–60 см между широкими (1.5–2 см) трещинами, в-третьих, осветленные поверхностные корочки и наличие скелетан из отмытых песчаных зерен и линз песка в пахотном горизонте, возникавших при разрушении агрегатов во время полива водами с повышенным содержанием ионов натрия.

Полные названия почв, входящих в группу 3:

– агроземы аккумулятивно-карбонатные солонцеватые профильно-вскипающие среднесуглинистые опесчаненные поверхностно очень слабо каменистые на зеленых (глауконитовых) суглинках, подстилаемых со 100–110 см слоистыми зелеными глинистыми и песчаными отложениями с профилем P1ca,sk'–P2ca,ad,sk'–Bca,sn–BCAmc,sn–BC(ca),cs–2BDcs–2Dcs–3D2 (светло-каштановыми пахотными солонцеватыми карбонатными среднесуглинистыми по K-1977; Luvic Kastanozem (Aric, Loamic, Protosodic, Raptic) по WRB-2015);

– агросолонцы светлые сегрегационные срединно-вскипающие среднесуглинистые очень слабо каменистые на двучленных отложениях из каменистых бурых суглинков до 50 см на зеленых глауконитовых суглинках, подстилаемых с 70–80 см очень сильно щебнистыми отложениями, профиль P1sk'–P2ad,sk'–SNsk'–BCA1nc,sn,sk'–2BCA2nc,sn,sk'–3Dsk'''ca,ic (солонцы степные каштановые пахотные срединно-карбонатные среднесуглинистые на двучленных суглинистых каменистых отложениях по K-1977; Haplic Solonetz (Aric, Loamic, Cutanic, Ochric, Endoskeletal, Raptic) по WRB-2015).

Общая площадь почв группы 4 составляет 24.18 га, или 7%. Эта группа включает супесчаные слабокаменистые почвы на двучленных отложениях, второй литологический слой которых начинается на глубине 30–50 см и представлен красноцветными песками, или зелеными (глауконитовыми) песками, или легкими суглинками:

– агроземы ожелезненные глинисто-иллювирированные агроабрадированные агроперуплотненные супесчано-песчаные очень слабо каменистые с профилем P1sk'–P2ad,sk'–P3pb,ad,sk'–Bf,i,sk'–2BD–3D2–4D3ff (светло-каштановые пахотные супесчаные почвы на двучленных отложениях по K-1977; Rhodic Brunic Arenosol (Aric, Ochric, Raptic) по WRB-2015);

– агроземы аккумулятивно-карбонатные сегрегационные литохромные агроабрадированные высоковскипающие супесчано-легкосуглинистые очень слабо каменистые с профилем P1sk'–P2sk'–P3pb,(ca),sk'–2BCAnc–2BCsa–3D(ca) (светло-каштановые пахотные супесчаные почвы на двучленных отложениях по K-1977; Eutric Cambisol

(Aric, Epiarenic, Katoloamic, Ochric, Protocalcic, Raptic) по WRB-2015);

– агроземы гумусово-стратифицированные литохромные глубоковскипающие супесчано-легкосуглинистые очень слабо каменистые на зеленых суглинках с профилем P1rh,sk'–P2rh,sk'–2Ppa,sk'–2B–2Bca–2BCsa–2Csa (светло-каштановые пахотные супесчаные намытые почвы по K-1977; Eutric Cambisol (Aric, Epiarenic, Katoloamic, Areninovic, Ochric, Raptic) по WRB-2015).

Почвы групп 5 и 6 сформированы на двучленных отложениях, верхний литологический слой которых имеет мощность 30–55 см и представлен суглинистыми отложениями с очень редким силикатным гравием и камнями. Отличаются эти группы друг от друга, в первую очередь, по вскипанию с дневной поверхности: наличию в группе 5 и отсутствию в группе 6.

Общая площадь почв группы 5 составляет 64.2 га, или 18.7%. Все почвы этой группы имеют сильное вскипание от HCl с дневной поверхности, среднесуглинистый гранулометрический состав с редкой встречаемостью силикатного гравия и камешков как на поверхности, так и в поверхностных горизонтах и литологическую слоистость почвенного профиля. Поверхностный литологический слой имеет мощность от 30 до 55 см и представлен очень слабо каменистыми средними суглинками бурого цвета. Под ним встречаются пески разного цвета (морфоны зеленые, красные, ржаво-оранжевые, палевые) с камнями либо суглинки пестрой окраски (морфоны зеленые, палевые, бурые, красно-бурые, ржаво-оранжевые) с обильными прожилками гипса и ярко выраженными пленками из мелкокристаллического гипса (гипсанами).

В группу 5 входят разные подтипы агроземов аккумулятивно-карбонатных профильно-вскипающих среднесуглинистых:

– сегрегационные солонцеватые агроперуплотненные литохромные – профиль P1sk'–P2ad,sk'–Bsn,sk'–Bca,sn,sk'–BCAnc,sn,sk'–2Dca–2Dca,q–2Dca,q,cs (светло-каштановые пахотные солонцеватые среднесуглинистые на двучленных суглинистых отложениях разного цвета: красных песчаных суглинках, подстилаемых с 50 см карбонатными зелеными суглинками с оранжево-ржавыми пятнами, по K-1977); Luvic Kastanozem (Aric, Loamic, Protosodic, Raptic) по WRB-2015);

– сегрегационно-натечные агроперуплотненные гипсосодежающие – профиль P1ca,sk'–P2ca,ad,sk'–P3ca,pb,sk'–BCAnc,ic,sk'–2Dca,cs,sand (светло-каштановые пахотные карбонатные среднесуглинистые на двучленных отложениях: палево-бурых суглинках с камнями, подстилаемых с 50 см пестрыми песками с карбонатами, по K-1977; Luvic Kastanozem (Aric, Loamic, Protosodic, Raptic) по WRB-2015);

— мицелярно-диффузные солонцеватые агропереуплотненные литохромные — профиль P1ca,sk'—P2ca,ad,sk'—P3ca,pb,sk'—2BCAmc,dc,sn—2Dca,sn,loam—3D3ca,sn—4D4ca,sn (светло-каштановые пахотные солонцеватые карбонатные среднесуглинистые на двучленных отложениях: палево-бурых суглинках с камнями, подстилаемых с 28 см пестрыми суглинками, по K-1977; Luvic Kastanozem (Aric, Loamic, Protosodic, Raptic) по WRB-2015);

— диффузные солонцеватые гипсосодержащие — профиль P1ca,sk'—P2ca,sk'—3ca,pb,sk'—BCAdc,sn,sk'—2BDca,cs—3D2sand—4D3clay (светло-каштановые пахотные солонцеватые карбонатные среднесуглинистые на палево-бурых суглинках, подстилаемых с 55 см пестроцветными суглинками с гипсом, с 120 см зеленым песком с линзами суглинка, с 150 см оливковой глиной с прослоями суглинка, по K-1977; Luvic Gypsic Kastanozem (Aric, Loamic, Protosodic) по WRB-2015).

Площадь почв группы 6 составляет 35.2 га, или 10.3%. Общими свойствами этой группы являются, во-первых, отсутствие вскипания от HCl с дневной поверхности до глубины 28–40 см, во-вторых, наличие очень слабой каменистости на дневной поверхности, в-третьих, малая мощность первого от поверхности литологического слоя, составляющая 50–55 см, в-четвертых, легко- или среднесуглинистый гранулометрический состав, в-пятых, проявление солонцеватости в средней части профиля. Почвообразующий материал поверхностного литологического слоя различается по окраске: встречаются красные, рыжие и бурые песчаные суглинки.

Почвы, входящие в группу 6:

— агрокаштановые солонцеватые квазиглееватые сегрегационные высоковскипающие легкосуглинистые очень слабо каменистые с профилем P1sk'—P2sk'—P3sk'—BMKsn—BCAnc—2BD1ca,nc,sand—3BD2ca,nc,loam—4D3(ca),sand (светло-каштановые пахотные солонцеватые легкосуглинистые на бурых очень слабо каменистых суглинках, подстилаемых с полуметра слоистыми отложениями, по K-1977; Luvic Kastanozem (Aric, Loamic, Protosodic, Bathyarenic) по WRB-2015);

— агроземы аккумулятивно-карбонатные сегрегационные солонцеватые квазиглееватые литохромные высоковскипающие глубокогипсосодержащие среднесуглинистые очень слабо каменистые с профилем P1sk'—P2sk'—Bsn,sk'—Bca,sn,sk'—BCAnc,sn,sk'—2Dca—2Dca,q—2Dca,q,cs—3D2q (светло-каштановые пахотные солонцеватые среднесуглинистые на двучленных суглинистых отложениях: рыжих песчаных суглинках, подстилаемых с 50 см пестроцветными суглинками, по K-1977; Luvic Kastanozem (Aric, Loamic, Protosodic, Raptic) по WRB-2015);

— агроземы солонцеватые литохромные краснокрасные высоковскипающие глубокогипсо-

держащие среднесуглинистые очень слабо каменистые с профилем P1sk'—P2sk'—P3sk'—P4pb,(ca),sk'—Bca,sn,ro,sk'—2Dca,nc—Dcs (светло-каштановые пахотные солонцеватые среднесуглинистые на двучленных суглинистых отложениях разного цвета: красных песчаных суглинках, подстилаемых с 50 см карбонатными зелеными суглинками с оранжево-ржавыми пятнами, по K-1977; Eutric Cambisol (Aric, Loamic, Ochric, Raptic) по WRB-2015).

Группы 7 и 8 характеризуются наиболее мощным (70–150 см) первым от поверхности литологическим слоем палево-бурых суглинков, в пределах которого была возможность формирования всех основных генетических горизонтов почв солонцовых комплексов. Их отличие друг от друга обусловлено преимущественно наличием (группа 7) или отсутствием (группа 8) вскипания от HCl с дневной поверхности.

Общая площадь почв группы 7 составляет 73.5 га, или 21.4%. Группа включает почвы, вскипающие от HCl с дневной поверхности и развитые на палево-бурых суглинках мощностью 70 см и более, подстилаемых пестрыми суглинками или песками с гравием и без него:

— агрокаштановые солонцеватые сегрегационные профильно-вскипающие среднесуглинистые почвы P1ca—P2ca—BMKca,sn—Bca,sn—BCAnc—BCca—2Dca,loam (светло-каштановые пахотные солонцеватые карбонатные среднесуглинистые почвы по K-1977; Luvic Kastanozem (Aric, Loamic, Protosodic, Raptic) по WRB-2015); палево-бурые суглинки в этих почвах имеют мощность 80–100 см, глубже они подстилаются зелеными суглинками с силикатным гравием или красными песчаными суглинками с силикатным гравием;

— агрокаштановые солонцеватые карбонатно-гумусово-стратифицированные сегрегационные сложно-вскипающие среднесуглинистые P1ca,rh—P2—P3—BMKsn—Bca,sn—BCAnc,sn—2BDca,nc,ro (светло-каштановые пахотные солонцеватые с натасанным карбонатным слоем среднесуглинистые почвы по K-1977; Luvic Kastanozem (Aric, Loamic, Novic, Protosodic, Raptic) по WRB-2015); вскипание от HCl наблюдается в намытой части пахотного слоя 0–20 см, нижняя часть пахотного слоя и ксерометаморфический горизонт сохранились выщелоченными от карбонатов, нижележащие горизонты имеют природное распределение карбонатов;

— агроземы аккумулятивно-карбонатные сегрегационные солонцеватые профильно-вскипающие среднесуглинистые P1ca—P2ca—P3ca,pb—Bca,sn—BCAnc—BCca—2Dca,sk',sand (светло-каштановые пахотные солонцеватые карбонатные слабосмытые среднесуглинистые почвы по K-1977; Luvic Kastanozem (Aric, Loamic, Protosodic, Raptic) по WRB-2015); почвы подстилаются со 100–120 см карбонатным песком с редким гравием и камнями;

— агроземы аккумулятивно-карбонатные сегрегационные профильно-вскипающие легкосуглинистые P1ca–P2ca–Bca–BCAnc–BCsa–2D(ca,sk'),sand (светло-каштановые пахотные карбонатные слабосмытые легкосуглинистые почвы по К-1977; Haplic Kastanozem (Aric, Loamic, Raptic) по WRB-2015); почвы подстилаются со 100–120 см бескарбонатным тонкозернистым песком с редким карбонатным гравием;

— агроземы аккумулятивно-карбонатные сегрегационные гипсосодержащие профильно-вскипающие среднесуглинистые очень слабо каменистые P1ca,sk'–P2ca,ad,sk'–P3ca,pb,sk'–Bca,sk'–BCAnc,sk'–2BCAnc,i–3Dca,dc,cs,sand (светло-каштановые пахотные карбонатные слабосмытые среднесуглинистые почвы по К-1977; Haplic Kastanozem (Aric, Loamic, Raptic) по WRB-2015); почвы развиты на бурых очень слабо каменистых суглинках, подстилаемых с 70 см пестроцветными (зелеными, красными, желтыми) карбонатными песками с силикатным гравием и гипсом.

Согласно полевым исследованиям и классификации снимка, фоновой и преобладающей является почва группы 8, характеризующая наименьшей спектральной яркостью. Ее общая площадь составляет 115.7 га, или 33.8%. Она включает почвы, не вскипающие от HCl с дневной поверхности и формирующиеся на палево-бурых суглинках мощностью 70 см и более, подстилаемых пестрыми суглинками или песками:

— агрокаштановые солонцеватые сегрегационные высоковскипающие среднесуглинистые P1–P2–BMKsn–Bca,sn–BCAnc,sn–BCsa–2Dca,sand (светло-каштановые пахотные солонцеватые по К-1977, Luvic Kastanozem (Aric, Loamic, Protosodic, Bathyarenic) по WRB-2015); почвы развиты на бурых суглинках мощностью 100–120 см, глубже они подстилаются зелеными суглинками с гравием или песком;

— агроземы аккумулятивно-карбонатные сегрегационные солонцеватые высоковскипающие легкосуглинистые P1–P2–P3pb,(ca)–Bca,sn–BCAnc,sn–2BDcs,(ca)–2Dsand (светло-каштановые солонцеватые пахотные слабосмытые по К-1977; Haplic Kastanozem (Aric, Pantoloamic, Bathyarenic, Raptic) по WRB-2015); почвы подстилаются с глубины 70–100 см зелеными (глауконитовыми) суглинками с гипсом или карбонатным зеленым песком;

— агросолонцы светлые сегрегационные срединно-вскипающие средне-тяжелосуглинистые P1–P2–P3–SN–BCAnc,sn–BCAnc–2Dloam+sand–3D2sand (солонцы степные каштановые пахотные среднесуглинистые по К-1977; Haplic Solonetz (Aric, Loamic, Cutanic, Raptic) по WRB-2015); бурые суглинки имеют мощность 70–90 см, глубже залегают слоистые зеленые карбонатные суглинки и пески.

Соотношение площади восьми групп почв представлено на рис. 5.

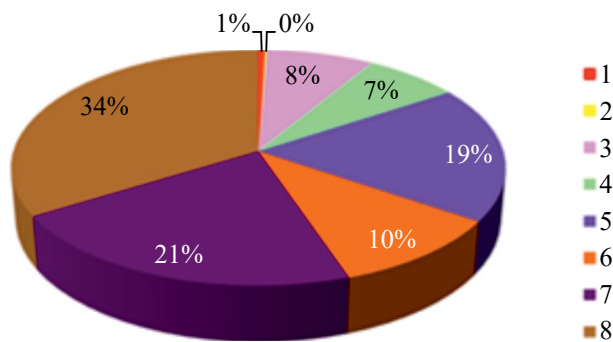


Рис. 5. Долевое участие восьми групп почв на ключевом участке, выделенных по спектральным характеристикам космического снимка. Обозначения групп см. рис. 3.

Таким образом, в результате классификации были выделены ареалы скопления камней и распространения песков на поверхности почв, которые создают помехи при обработке полей и нуждаются в мелиорации (удаление камней, закрепление песков) в первую очередь. Особого внимания требуют супесчаные почвы, почвы с каменистыми, щебнистыми отложениями на глубине около 50 см.

Широкое распространение поверхностно-вскипающих карбонатных почв отражает антропогенное влияние на почвенный покров, когда в результате вспашки и эрозии почв карбонаты оказываются на поверхности. Такие почвы способствуют образованию корки, формирующейся на поверхности поля после ливневых дождей или поливов.

ОБСУЖДЕНИЕ

Андроников писал, что “почва, как природный объект, имеющий определенное строение генетического профиля и различные почвенные горизонты, не изображается на аэроснимках. На них мы видим показатели только поверхностного горизонта. Однако этот основной поверхностный горизонт генетически связан со всем профилем почвы. Поэтому, анализируя изображение поверхностного горизонта по аэро- и космическим снимкам, можно в большинстве случаев не только определять, дешифрировать смену и границы почв, но и (при полевых исследованиях при наличии образцов – эталонов дешифрирования почв или почвенных карт) проводить определение почвенного покрова” [2, с. 39]. Используя этот подход, были разработаны методики картографирования почв с использованием дешифрирования почв по аэро- и космическим снимкам [2, 3, 17, 18, 25].

Исследование разными авторами связи между свойствами поверхностных горизонтов почв и спектральными характеристиками по материалам дистанционного зондирования Земли показало,

что на спектр отражения излучений почв оказывают влияние содержание органического вещества [2, 9, 19, 21, 22, 32–34, 42–44], карбонатов [7, 8, 29, 32], легкорастворимых солей [9, 24, 32, 38, 39], различных соединений железа [2, 32], а также влажность [1, 2, 19, 26, 32, 40, 44], гранулометрический состав почв [2, 30, 44, 46], шероховатость [26], каменистость поверхности [2, 14, 21], наличие корок [9, 22, 31].

Указанные свойства имеют разное проявление в почвах, что создает региональную специфику дистанционной диагностики почв по спектральным характеристикам открытой поверхности.

Китайские ученые [38] использовали оптическую и мультиспектральную съемку со спутника ЕТМ+ для определения засоления почв с разных глубин (0–10, 10–30 и 30–50 см) на территории оазиса Хиньянг (Китай). Полученные данные показали, что существует высокая корреляция между отражательной способностью и засолением почвы и связь наиболее тесно проявляется в слое почвы 0–10 см.

С помощью дистанционных материалов хорошо выделяются поверхностно-карбонатные почвы на территории Светлоярской ОС в Волгоградской области [7, 8, 29].

Картографирование каменистости почв для Саратовского региона было проведено при совместном использовании спутниковых данных и радарной информации, согласно разработанной специальной модели [21].

Авторами [22] получены хорошие регрессионные модели связи ($R^2 = 0.9$) содержания органического вещества в пахотном горизонте черноземов выщелоченных тяжелосуглинистых и спутниковых данных Landsat 8–9 OLI на примере участка 32 га в Серебряно-Прудском районе Московской области. Отмечается, что наличие корки на открытой поверхности почв способствовало более высокой вариабельности и более низкому коэффициенту детерминации.

Формирование спектральных отражательных свойств поверхности пахотных почв происходит под воздействием целого ряда природных и антропогенных факторов, придающих ей своеобразные признаки. К ним относятся агротехнические обработки, увлажнение и др. Так, [9] при определении содержания гумуса и водорастворимых солей в почвах сельскохозяйственных угодий черноземной зоны отмечает, что на спектральные характеристики влияют различные корки, формирующиеся на поверхности почвы. Эти горизонты могут иметь крайне малую мощность, всего лишь несколько миллиметров, но весьма существенно отличаться по своим свойствам, в том числе и оптическим.

В представленной работе показано, что спектральные яркости восьми групп почв на разных

почвообразующих и подстилающих породах хорошо характеризуют свойства собственно поверхности почвы, а также пахотного горизонта. Строение профиля почв отражается значительно хуже.

По поверхностным свойствам на исследуемом участке юга Приволжской возвышенности очень хорошо выделяются ареалы с сильной каменистостью (группа 1) и песчаные почвы (группа 2). Эти ареалы самые светлые.

Достаточно надежно дешифрируются ареалы супесчаных с поверхности почв (группа 4). Однако в пределах этой группы невозможно различить ареалы агроземов ожелезненных супесчано-песчаных, агроземов аккумулятивно-карбонатных высококовскипающих супесчано-легкосуглинистых и агроземов гумусово-стратифицированных (намыто-наташенных со склона) литохромных глубоковскипающих супесчано-легкосуглинистых. Почвы имеют близкий по свойствам супесчаный очень слабо каменистый неовскипающий агрогумусовый горизонт Psk', тогда как средняя и нижняя части почвенных профилей развиты из материалов разных пород: бескарбонатных песков разного цвета (красно-бурых, желтых, зеленых), карбонатных и бескарбонатных зеленых (глауконитовых) суглинков. В результате ареалы четвертой группы почв представляют собой эрозионно-аккумулятивные сочетания-мозаики нескольких почв на склоне с переменным уклоном и слоистыми палеоген-неогеновыми песчано-суглинистыми отложениями.

Фоновая группа почв 8 развита на территориях с наибольшей мощностью первого литологического слоя в виде четвертичных палево-бурых средних суглинков. Мощность этих суглинков 70–150 см обеспечила формирование полного профиля основных компонентов светло-каштановых солонцовых комплексов. В пределах поля 8 (рис. 3а), которое использовалось только в богарном земледелии, все почвы, выделенные в группу почв 8 по спектральным характеристикам (рис. 3б), не имеют карбонатов в пахотном горизонте — отсутствие вскипания от HCl с дневной поверхности и в пределах горизонта Р. Это свойство и определило выделение группы 8 как наиболее темной на снимке. Вместе с тем по спектральным характеристикам в пределах этой группы не удалось различить агрокаштановые солонцеватые почвы с полным набором горизонтов, включая ксерометаморфический ВМК, агроземы аккумулятивно-карбонатные солонцеватые высококовскипающие, в которых горизонт ВМК уничтожен вспашкой, и агросолонцы с сохранившимся солонцовым горизонтом SN. Иными словами, ареалы группы почв 8 (рис. 3б) отражают антропогенно-преобразованный каштановый солонцовый комплекс на пологих приводораздельных склонах с палево-бурыми средними суглинками, имеющими мощность более 70 см.

Обратим внимание, что этот солонцовый комплекс в результате антропогенного преобразования стал более сложным за счет появления карбонатных с поверхности почв, которые удалось выделить по спектральным характеристикам в группу 7. Ареалы этой группы вкраплены в фоновый ареал группы 8. Они приурочены к ровным или слабо-вогнутым позициям пологого приводораздельного склона с плащом четвертичных палео-бурых суглинков мощностью 70–150 см. Однако общее их свойство — сильное вскипание от HCl с дневной поверхности — обусловлено разными причинами: (1) частичной припашкой окарбонатченного ксерометаморфического горизонта ВМКса, (2) полного его удаления в результате частичного смыва пахотного горизонта и припашки верхней части аккумулятивно-карбонатного горизонта BCanc или (3) намыва карбонатно-гумусированного материала на агрокаштановые почвы. В результате ареалы группы почв 7 сами по себе являются эрозивно-аккумулятивным каштановым солонцовым комплексом с карбонатным пахотным горизонтом во всех компонентах.

В пределах исследуемого участка на космическом снимке (рис. 3а) и на карте с результатами классификации космического изображения на 8 классов (рис. 3б) видна дуга кольцевой структуры палеоген-неогеновых отложений. Эта дуга проявляется в рельефе в виде более крутого склона длиной около 100 м между более пологими поверхностями с двух сторон от него, в пределах которых доминируют группы почв 7 и 8 с пахотным солонцовым комплексом. На крутой части склона происходит частая литологическая смена слоев отложений небольшой мощности. Это отразилось на возможности выделения групп почв 5 и 6 на двучленных отложениях с мощностью первого литологического слоя около полуметра. Группы между собой различаются по наличию (группа 5) или отсутствию (группа 6) вскипания от HCl с дневной поверхности. Присутствие карбонатов в пахотном слое увеличивает значения спектральной яркости. Каждая из этих групп представлена несколькими почвами. Поэтому ареалы группы 6 представляют литогенные сочетания-мозаики агрокаштановых солонцеватых почв и разных агроземов солонцеватых с бескарбонатными пахотными горизонтами. Ареалы группы 5 также являются сочетаниями-мозаиками агрокаштановых почв и агроземов, которые имеют карбонатные пахотные горизонты. При этом литогенный фон этих мозаик различается.

Таким образом, наблюдается неполное соответствие свойств поверхности почвы и строения почвенного профиля. В результате выделенные группы почв отражают некоторые структуры почвенного покрова, в пределах которых почвы имеют близкие поверхностные свойства и близкие спектральные характеристики.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены результаты классификации космического изображения высокого разрешения (Pleiades, 25.04.2020) территории ключевого участка (343 га), который расположен в границах ФГБУ “Опытная станция “Орошаемая”, входящей в Волго-Донскую ОС в Волгоградской области. Участок исследования находится на юге Приволжской возвышенности. В процессе классификации снимка было выделено восемь групп почв, сформированных на разных почвообразующих и подстилающих породах, преимущественно палеогенового и неогенового возраста, перекрытых плащом четвертичных бурых суглинков переменной мощности от 1–2 м до полного выклинивания. Породы палеогенового и неогенового возраста представлены пестрыми по цвету суглинками, супесями, песками, каменистыми и щебнистыми отложениями. Яркостные различия пятен на поле позволили разделить каменистые, песчаные, супесчаные и щебнистые почвы от суглинистых почв, имеющих или не имеющих вскипание от HCl с дневной поверхности.

На снимке выделено восемь классов, из которых фоновыми являются не вскипающие (34%, группа 8) и вскипающие (21%, группа 7) с поверхности почвы светло-каштановых солонцовых комплексов на палео-бурых суглинках мощностью более 70 см, подстилаемые пестрыми суглинками или песками. Значительную долю площади занимают не вскипающие (10%, группа 6) и вскипающие (19%, группа 5) с поверхности почвы светло-каштановых солонцовых комплексов на очень слабо каменистых суглинках разного цвета (бурых, красно-бурых, зеленых) мощностью 30–60 см, подстилаемых пестрыми суглинками или песками, агросолонцы и сильносолонцеватые почвы с осветленными корочками на поверхности без вскипания (8%, группа 3) и очень слабо каменистые супесчаные почвы (7%, группа 4). Отдельно выделяются небольшие ареалы почв со скоплением плоского карбонатного щебня на поверхности (0.5%) и выходом песка (0.1%) на поверхность. Полученная информация свидетельствует о том, что более половины площади участка нуждается в проведении мелиоративных работ, таких как сбор камней, закрепление песков, улучшение структуры супесчаных почв. Поверхностно-вскипающие карбонатные почвы нуждаются в постоянном рыхлении корки, образующейся на поверхности поля после ливней или поливов.

Внутри отдельных классов объединены почвы с разным строением профиля (агрокаштановые, агроземы, агросолонцы), которые вместе представляют антропогенно преобразованные светло-каштановые солонцовые комплексы с бескарбонатными (группа 8) и карбонатными (группа 7) пахотными горизонтами и проявлением

эрозионно-аккумулятивных процессов на палево-бурых средних суглинках, либо литогенные сочетания-мозаики агрокаштановых солонцеватых и разных агроземов с бескарбонатными (группа 6) и карбонатными (группа 5) пахотными горизонтами. Почвы одного типа и иногда подтипа попадают в разные классы по спектральным характеристикам. Это обусловлено неполным соответствием свойств поверхности почвы, которые влияют на спектральные характеристики, и внутреннего строения почвенного профиля в целом.

В результате по сочетанию анализа спектральных характеристик космического снимка и наземного почвенного обследования катенами и трансектами удастся распознавать разные почвенные комбинации, которые в совокупности образуют структуру почвенного покрова территории.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ по проекту № 0439-2022-0009, ЕГИСУ НИОКТР № 122022800220-5.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

В данной работе отсутствуют исследования человека или животных.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Азизов Б.М., Мамедов Р.Г., Султанова Н.Б., Герайзаде А.П. Микрофотометрический анализ влажности почв по данным дистанционной съемки // *Аэрокосмические методы в почвоведении и их использование в сельском хозяйстве*. М.: Наука, 1990. С. 183–189.
2. Андроников В.Л. Аэрокосмические методы изучения почв. М: Колос, 1979. 280 с.
3. Андроников В.Л., Афанасьева Т.В., Симакова М.С. Дешифрирование по аэро- и космическим снимкам почвенного покрова основных природных зон страны для картографирования // *Аэрокосмические методы в почвоведении и их использование в сельском хозяйстве*. М.: Наука, 1990. С. 22–34.
4. Барановская А.В., Азовцев В.И. Влияние орошения на миграцию карбонатов в почвах Поволжья // *Почвоведение*. 1981. № 10. С. 17–26.
5. Волгоградская область: природные условия, ресурсы, хозяйство, население, геоэкологическое состояние. Волгоград: Перемена, 2011. 528 с.
6. Горохова И.Н., Хитров Н.Б. Распознавание каменистых, песчаных и карбонатных с поверхности почв на юге Приволжской возвышенности (Волгоградская область) по космическим // *Почвоведение*. 2023. № 11. С. 1340–1356.
7. Горохова И.Н., Панкова Е.И. Природа пятнистости орошаемых почв сухостепной зоны (на примере Светлоярской оросительной системы) // *Аридные экосистемы*. 2017. Т. 23. № 3(72). С. 44–54.
8. Горохова И.Н., Хитров Н.Б., Прокопьева К.О., Харланов В.А. Почвенный покров Светлоярской оросительной системы через полвека мелиоративных воздействий // *Почвоведение*. 2018. № 8. С. 1033–1044.
9. Гуров А.Ф., Рачкудик В.И., Буданов В.Е. Возможности дистанционного определения содержания гумуса и водорастворимых солей в почвах сельскохозяйственных угодий // *Мониторинг земель. Опыт, проблемы, перспективы развития*. М., 1991. С. 165–180.
10. Дегтярева Е.Т., Жулидова А.Н. Почвы Волгоградской области. Волгоград: Нижне-Волжское книжное изд-во, 1970. 319 с.
11. Доклад о состоянии и использовании земель сельскохозяйственного назначения РФ в 2020 г. М.: Росинформагротех. 2022. 384 с.
12. Зимовец Б.А. Экология и мелиорация почв сухостепной зоны. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 1991. 248 с.
13. Зинченко Е.В., Горохова И.Н., Круглякова Н.Г., Хитров Н.Б. Современное состояние орошаемых почв юга Приволжской возвышенности. // *Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева*. 2020. Вып. 104. С. 68–109. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-104-68-109>
14. Кирьянова Е.Ю., Савин И.Ю. О возможностях оценки контрастности почвенного покрова Саратовского Поволжья по спутниковым данным Landsat // *Цифровая почвенная картография: теоретические и экспериментальные исследования*. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 2012. С. 190–209.
15. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
16. Классификация и диагностика почв СССР. М.: Колос, 1977. 247 с.
17. Методика составления крупномасштабных почвенных карт с применением материалов аэрофотосъемки. М.: Изд-во АН СССР, 1962. 116 с.
18. Методика составления крупномасштабных почвенно-мелиоративной карты и карты мелиоративной оценки почвенного покрова солонцевой

- территории. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 1985. 95 с.
19. Орлов Д.С. Спектральная отражательная способность почв и их компонентов. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2001. 175 с.
20. Полевой определитель почв России. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 2008. 182 с.
21. Прудникова Е.Ю. Автоматизированное картографирование почв по спутниковым данным для проектирования АЛСЗ (на примере тестовых полей в Саратовском Поволжье). Дис. ...канд. биол. наук. М., 2013. 20 с.
22. Прудникова Е.Ю., Савин И.Ю., Грубина П.Г. Спутниковая оценка агрономически важных свойств пахотных почв с учетом состояния их поверхности // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2023. Вып. 115. С. 129–159. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2023-115-129-159>
23. Руководство по описанию почв. Рим: Продовольственная и сельскохозяйственная организация объединенных наций, 2012. 101 с.
24. Рухович Д.И. Многолетняя динамика засоления орошаемых почв центральной части Голодной степи и методы ее выявления. Дис. ... канд. биол. наук. М., 2009. 24 с.
25. Симакова М.С. Методика картирования почв Прикаспийской низменности по материалам аэрофотосъемки // Почвенно-географические исследования и использование аэрофотосъемки в картировании почв. М.: Изд-во АН СССР, 1959. С. 283–357.
26. Толчельников Ю.С., Харитонов В.А., Горбачев В.В. Аэрокосмические методы в почвенно-мелиоративных исследованиях // Аэрокосмические методы в почвоведении и их использование в сельском хозяйстве. М.: Наука, 1990. С. 77–81.
27. Хитров Н.Б., Герасимова М.И. Диагностические горизонты в классификации почв России: версия 2021 // Почвоведение. 2021. № 8. С. 899–910.
28. Хитров Н.Б., Герасимова М.И. Предлагаемые изменения в классификации почв России: диагностические признаки и почвообразующие породы // Почвоведение. 2022. № 1. С. 3–14.
29. Хитров Н.Б., Горохова И.Н., Панкова Е.И. Дистанционная диагностика содержания карбонатов в орошаемых почвах сухостепной зоны Волгоградской области // Почвоведение. 2021. № 6. С. 657–674.
30. Barnes E., Baker M.G. Multispectral data for mapping soil texture: Possibilities and limitations // Appl. Engineer. Agriculture. 2000. V. 16(6). P. 731–741. <https://doi.org/10.13031/2013.5370>
31. Ben-Dor E., Goldshleger N., Benyamini Y., Agassi M.R., Blumberg D.G. The spectral reflectance properties of soil structural crusts in the 1.2-to 2.5- μm spectral region // Soil Sci. Soc. Am. J. 2003. V. 67. P. 289–299. <https://doi.org/10.2136/sssaj2003.2890>
32. Bowers S.A., Hanks R.J. Reflectance of radiant energy from soils // Soil Sci. 1965. V. 100. P. 130–138.
33. Coleman T.L., Agbu P.A., Montgomery O.L. Spectral differentiation on surface soils and soil properties: Is it possible from space platforms? // Soil Sci. 1993. V. 155. P. 283–293.
34. Fox G.A., Sabbagh G.J. Estimation of soil organic matter from red and near-infrared remotely sensed data using a soil line Euclidian distance technique // Soil Sci. Soc. Am. J. 2002. V. 66. P. 1922–1928.
35. <https://neerc.ifmo.ru>
36. IUSS Working Group WRB. 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. 2015. FAO, Rome. 192 p.
37. Jia-ge Chen, Jun Chen, Qin-jun Wang, Yue Zhang, Haifeng Ding, Zhang Huang. Retrieval of Soil Dispersion Using Hyperspectral Remote Sensing // Indian Society of Remote Sensing. 2016. V. 44. P. 563–572.
38. Jiang H., Shu H. Optical remote-sensing data based research on detecting soil salinity at different depth in an arid-area oasis, Xinjiang, China // Earth Science Informatics. 2018. P. 1–14. <https://doi.org/10.1007/s12145-018-0358-2>
39. Metternicht G., Zinck. J.A. Remote Sensing of soil salinization. Impact on land management. N.Y.: CRC Press. 2009. 374 p.
40. Lesaignoux A., Fabre S., Briotter X., Olioso A. Influence of surface soil moisture on spectral reflectance of bare soil in the 0.4–15 μm domain // Geosciences and Remote Sensing Lett. 2011. V. 8. P. 143–147.
41. Luiz Guilherme Medeiros Pessoa, Maria Betânia Galvão Dos Santos Freire, Bradford Paul Wilcox, Colleen Heather Machado Green, Rômulo José Tolêdo De Araújo, José Coelho De Araújo Filho. Spectral reflectance characteristics of soils in northeastern Brazil as influenced by salinity levels // Environ. Monitor. Assessment. 2016. V. 188. P. 616.
42. Rukhovich D.I., Koroleva P.V., Rukhovich 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, V. 13. P. 155. <https://doi.org/10.3390/rs13010155>
43. Rukhovich D.I., Koroleva P.V., Rukhovich A.D., Komissarov M. 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. P. 124. <https://doi.org/10.3390/rs15010124>

44. *Sinha A.K.* Spectral reflectance characteristics of soil and its correlation with soil properties and surface conditions // *J. Indian Soc. Remote Sensing*. 1986. V. 14. P. 1–9.
45. www.Hyperspectr.ru
46. *Xiao J., Shen, Y., Tateishi R., Bayaer W.* Development of topsoil grain size index for monitoring desertification in arid land using remote sensing // *Int. J. Remote Sensing*. 2006. V. 27. P. 2411–2422. <https://doi.org/10.1080/01431160600554363>

Identification of Surface-Carbonate Soils and Soils with Variegated Underlying Rocks Using Classification of Space Image, the South of Volga Upland

I. N. Gorokhova^{1, *}, N. B. Khitrov¹, and L. A. Tarnopolsky²

¹*Dokuchaev Soil Science Institute, Moscow, 119017 Russia*

²*Geoinformation Research Centre of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119019 Russia*

*e-mail: g-irina14@yandex.ru

The aim of the work is to reveal the correlations between the spectral characteristics of the open soil surface in the Pleiades image (04/25/2020) and soils in a key plot with a complex soil cover pattern in the southern part of the Volga upland (Volga-Don irrigation system, Volgograd oblast). The territory is characterized by high lithological heterogeneity: Paleogene and Neogene sands and loams are overlain by a cover of Quaternary brown loams of variable thickness from 1–2 m to complete wedging. The soil cover is represented by light chestnut solonetzic complexes complicated by a mosaic of lithological variants and erosion-accumulative combinations. Basing on digital methods of processing the spectral characteristics of the satellite image and the use of ground-based soil information, eight soil groups were separated and a map of their distribution was created for a key plot of 343 ha. Soil groups differ in general features of the soil surface due to the presence and amount of rubble and stones, the texture of the surface horizon (from sand to medium loam), the presence of brightened crusts on the surface, the presence or absence of HCl effervescence from the surface, depending on the thickness of the first lithological layer. Within individual groups, soils with different profile structures (agro chestnut, agrozems, agrosolonetztes) are combined. Soils of the same type and sometimes subtype fall into different groups according to spectral characteristics. This is due to the incomplete correspondence of the properties of the soil surface, which affect the spectral characteristics, and the internal structure of the soil profile as a whole.

Keywords: spectral brightness, stony soils, sandy soils, surface-effervescent soils, variegated loams, Kastanozems (Aric), Solonetz (Aric)