

УДК 631.618:633.2.031

ПРИМЕНЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЛЯ ОЦЕНКИ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ДЕРНОВО-ЛИТОГЕННЫХ ПОЧВ НА КРАСНО-БУРЫХ ГЛИНАХ

Жуков А. В., Задорожная Г. А., Андрусевич Е. В., Тур В. В.

*Днепропетровский государственный аграрный университет, Днепропетровск,
Zhukov_dnepr@rambler.ru*

Изучена возможность оценивания эдафических свойств дерново-литогенных почв на красно-бурых глинах по их цветовым особенностям. Категоризация почвенных образцов по оптическим характеристикам позволила выделить относительно однородные участки почвенного покрова технозема, которые характеризуются как спецификой эдафических свойств, так и связанными с ними экологическими условиями. Полученный результат доказывает возможность использования цветовых свойств поверхностного слоя техноземов для крупномасштабного картографирования экологически релевантной неоднородности почвенного покрова.

Ключевые слова: цвет почвы, рекультивация, интенсивность цветовых каналов, эдафические свойства.

ВВЕДЕНИЕ

Рекультивация земель – это осуществление различных работ, целью которых является не только частичное преобразование природных территориальных комплексов, нарушенных промышленностью, но и создание на их месте еще более производительных и рационально организованных элементов культурных антропогенных ландшафтов, т.е. оптимизация техногенных ландшафтов, улучшение условий окружающей среды [7]. Актуальным экологическим задачей является разработка методических приемов экспресс-оценки почвенных свойств, принятие с помощью геоинформационных технологий управленческих решений, которые будут способствовать повышению рекультивации.

В почвоведении доступным и информационно ценным методом является метод определения почвенных свойств по важнейшему морфологическому признаку – окраске. А. А. Роде (1971) относит цвет к группе физических свойств и признаков, которые существенно изменяются в процессе почвообразования и могут и должны быть сами по себе использованы для его изучения непосредственно для суждения о сущности и особенностях почвообразования.

Частично окраска почвы наследуется от почвообразующей породы, но в значительно большей степени приобретает в процессе почвообразования [11]. Цвет почвы служит качественным индикатором перераспределения в почве окиси железа и марганца (красные, бурые и желтые тона), явлений их восстановления (зеленые, сизые и голубые тона), а также новообразования и перераспределения гумуса (черные и серые, а иногда – черновато-красные тона) (Роде, 1971).

Используя подобное знание можно составить представление о вещественном составе, качестве почвы и ее главных характеристиках даже в полевом исследовании.

Однако визуальная оценка цвета почвы является субъективной. С целью замены субъективизма в оценке цвета почвы, применяют спектрофотометрический метод характеристики почвенной окраски с помощью измерения ее отражательной способности. Окраска почвы проявляется вследствие избирательного поглощения и диффузного отражения лучистой энергии солнца в области спектра, доступного для восприятия зрительным аппаратом. Отраженная от почвы радиация видимого диапазона с иным соотношением составных частей «белого» цвета и обуславливает ее цвет. Спектрофотометрический метод позволяет количественно и достаточно точно оценить это соотношение по интенсивности красного (R), зеленого (G) и голубого (B) каналов [8; 10; 2; 12; 1].

Целью исследования является изучение возможности оценивания эдафических свойств, которые играют важную роль в формировании экологических условий для существования растительных и животных организмов по цветовым особенностям техноземов.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Исследования проведены на научно-исследовательском стационаре ДГАУ в г. Орджоникидзе. Экспериментальный участок по изучению оптимальных режимов сельскохозяйственной рекультивации был создан в 1968–1970 гг. Отбор проб произведен на варианте техноземов, сформированных на красно-бурых глинах (географические координаты юго-западного угла полигона – 47°38'55.24''С.Ш., 34°08'33.30''В.Д.). На участке с 1995 до 2003 г. произрастал многолетний бобово-злаковый агрофитоценоз, после чего начался процесс натурализации растительного покрова.

Полигон, в пределах которого производился отбор проб, состоит из 7 трансект по 15 проб в каждой. Точки отбора проб формируют регулярную сетку с размером ячеей 3 м. Таким образом, общий объем выборки составил 105 проб. Отбор проб произведен на варианте техноземов, сформированных на красно-бурых глинах.

Описание растительного покрова проводили в пределах квадратов с боковой стороной 3 м. Материал собирали в июне 2012 г.

Твердость почв измеряли в полевых условиях с помощью ручного пенетрометра Eijkelkamp на глубину до 50 см с интервалом 5 см. Средняя погрешность результатов измерений прибора составляет $\pm 8\%$. Для измерения использовали конус с размером поперечного сечения 1 см². В пределах каждой ячейки измерения твердости почвы производили в однократной повторности.

Определение агрегатного состава производилось с помощью сухого просеивания [6].

Для измерения электропроводности почвы *in situ* создан ряд приборов, к числу которых относится сенсор HI 76305 (Hanna Instruments, Woodsocket, R. I.), работающий совместно с портативным прибором HI 993310. Тестер оценивает общую электропроводность почвы, т.е. объединенную проводимость почвенного

воздуха, воды и частиц. Результаты измерений прибора представлены в единицах насыщенности почвенного раствора солями – г/л. Сравнение результатов измерений прибором HI 76305 с данными лабораторных исследований позволили оценить коэффициент перевода единиц как $1 \text{ дС/м} = 155 \text{ мг/л}$.

Содержание гумуса определено по методу Тюрина. Усадку почвы при высушении измеряли по А. Ф. Вадюниной и З. А. Корчагиной [6]. Просеянные почвенные образцы доводились до влажности $31,17 \pm 0,35 \%$. После постепенного высушивания в лаборатории образцы дополнительно высушивались в сушильном шкафу при 105°C в течении 5 часов. Размер почвенных образцов после усадки измеряли штангенциркулем.

Образцы, которые подготавливались для проведения анализа усадки, фотографировались цифровой фотокамерой до и после высухания. В качестве фона фотографировался листок белой бумаги. В программе ImageJ проводилось измерение интенсивности цветовых каналов в RGB-формате. От измеренных значений отнималось значение данных, полученных для фонового белого цвета. Для каждого снимка измерения проводились в 3-х кратной повторности [5].

Экоморфический анализ растительности проведен по А. Л. Бельгарду [4]. Биолого-экологическая характеристика растений проведена по работе В. В. Тарасова [13]. В работе использованы фитоиндикационные шкалы Д. Н. Цыганова [14] (База данных «Флора сосудистых растений Центральной России», <http://www.jcbi.ru/eco1>).

Статистические расчеты проведены с помощью программы Statistica 7.0, двумерное картографирование и оценка геостатистических показателей – с использованием программы Surfer 8.0.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Соотношение интенсивностей в синем, зеленом и красном канале описывает изменение цвета почвы (табл. 1). Интенсивность в красном канале принципиально отличается от интенсивностей в синем и зеленом по уровню варибельности. Коэффициент вариации красного канала составляет 56,38 и 43,18 % для влажной и сухой почвы соответственно. Для прочих каналов этот показатель значительно ниже (8,56–13,22 %). Это свидетельствует о том, что изменчивость цвета почвы в пределах изученного полигона происходит за счет варибельности красного цветового канала.

Варьирование эдафических свойств технозема, количественно выраженное через коэффициент вариации, находится на уровне, близком к варибельности интенсивности в красном канале, что позволяет предположить возможность индикации некоторых из них по цветовым характеристикам почвы.

Тест Колмогорова – Смирнова подтверждает принадлежность наблюдаемого распределения гумуса и интенсивности в красном канале в пределах дерново-литогенных почв на красно-бурых глинах гамма-закону ($d=0,06$, $p=n.s$ и $d=0,05$, $p=n.s$ соответственно) (рис. 1). Нормальному закону принадлежат распределения зеленого и синего каналов ($d=0,06$, $p=n.s$ и $d=0,03$, $p=n.s$ соответственно).

Таблица 1

Статистическая характеристика цветовых и эдафических свойств дерново-литогенных почв на красно-бурых глинах (образцы почвы отобраны с глубины 0–5 см)

Показатель	Среднее	Доверительный интервал		Минимум	Максимум	Коэффициент вариации, %
		–95 %	+95 %			
Интенсивность цветовых каналов						
Синий (влажная почва)	180,95	177,57	184,32	138,52	224,71	9,64
Зеленый (влажная почва)	114,36	112,47	116,26	96,76	141,04	8,56
Красный (влажная почва)	34,24	30,50	37,97	5,87	85,00	56,38
Синий (сухая почва)	167,63	164,55	170,72	133,91	206,20	9,52
Зеленый (сухая почва)	97,09	94,61	99,57	64,44	128,98	13,22
Красный (сухая почва)	28,26	25,90	30,63	7,36	59,58	43,18
Содержание гумуса и физические свойства технозема						
Гумус, %	0,73	0,69	0,77	0,35	1,38	29,29
Электропроводность, дСм/м	0,54	0,51	0,58	0,13	1,05	31,24
Максимальная гигроскопическая влажность, %	7,92	7,56	8,29	5,18	13,84	23,83
Усадка, %	20,79	20,04	21,54	12,00	30,00	18,69
Агрегатная структура, размер фракции в мм						
>10	23,34	21,21	25,48	7,64	53,38	47,17
7–10	7,78	7,26	8,30	3,03	14,36	34,66
5–7	8,48	7,73	9,24	1,07	20,26	46,00
3–5	14,39	13,43	15,35	4,15	26,96	34,39
2–3	13,15	12,27	14,02	5,65	24,71	34,44
1–2	18,64	17,24	20,04	2,21	40,39	38,81
0,5–1	4,16	3,73	4,59	0,10	11,11	53,78
0,25–0,5	6,27	5,60	6,94	1,19	18,74	55,42
<0,25	3,65	3,18	4,11	0,57	11,99	65,88
Твердость почвы в МПа на глубине, см						
0–5	3,28	3,08	3,48	1,60	7,60	31,85
5–10	4,56	4,22	4,91	1,60	9,00	39,35
10–15	5,49	5,10	5,88	0,70	9,79	36,88
15–20	6,30	5,85	6,74	1,80	12,29	36,85
20–25	6,98	6,46	7,50	1,80	14,83	38,38
25–30	7,43	6,84	8,01	1,69	17,24	40,98
30–35	7,86	7,23	8,49	1,64	19,16	41,45
35–40	8,11	7,41	8,80	2,01	21,51	44,20
40–45	8,36	7,61	9,11	1,86	23,83	46,42
45–50	8,56	7,75	9,37	1,89	25,77	48,77

Гамма-распределение может быть преобразовано в нормальное распределение операцией извлечения квадратного корня. Распределения корня квадратного из

данных по гумусу и интенсивности в красном канале соответствуют нормальному закону ($0,07, p=n.s.$ и $d=0,03, p=n.s.$ соответственно).

Таким образом, для применения параметрических методов статистического анализа для данных по гумусу и интенсивности в красном канале мы использовали преобразованные переменные операцией извлечения корня квадратного, а данные об интенсивности в синем и зеленом каналах применялись без изменений.

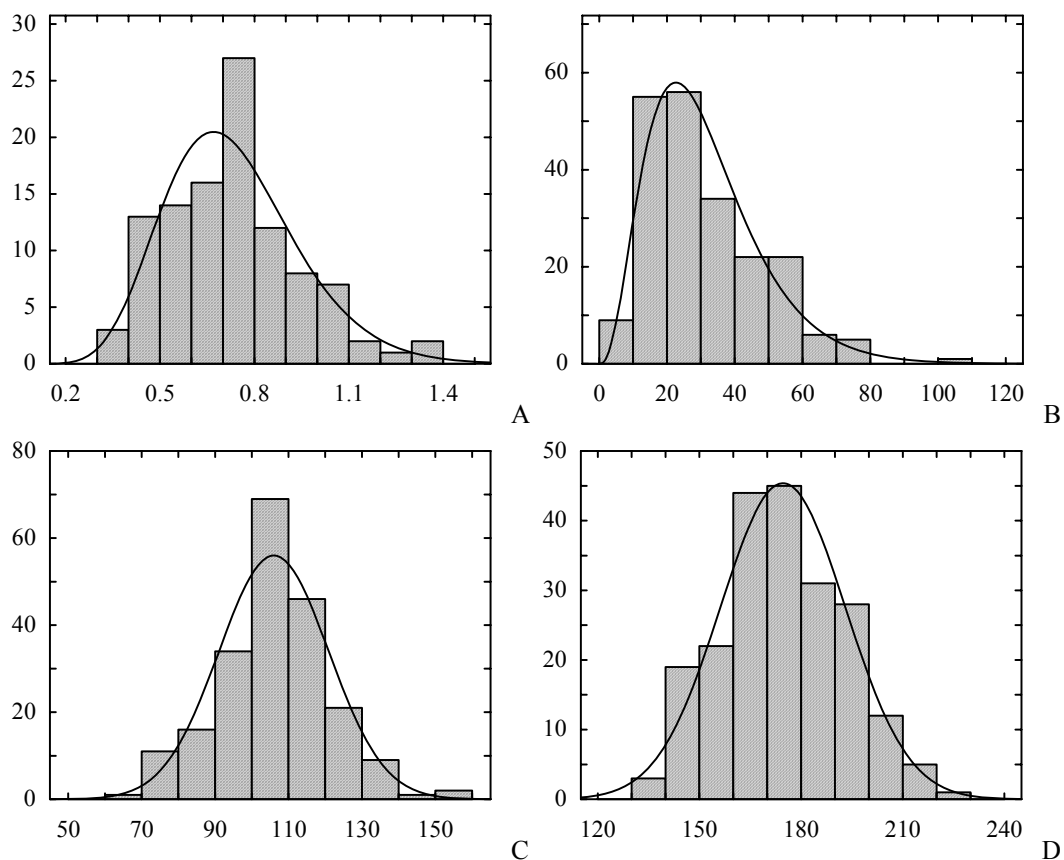


Рис. 1. Распределение содержания гумуса (в %) и интенсивности цветowych каналов в дерново-литогенных почвах на красно-бурых глинах

По оси ординат – число наблюдений; А – гумус (сплошная линия показывает гипотетическое гамма-распределение); В – красный канал (сплошная линия – гамма-распределение); С – зеленый канал (сплошная линия здесь и далее – нормальное распределение); D – синий канал.

Пространственная изменчивость содержания гумуса и цветowych свойств дерново-литогенных почв на красно-бурых глинах представлена на рисунке 2.

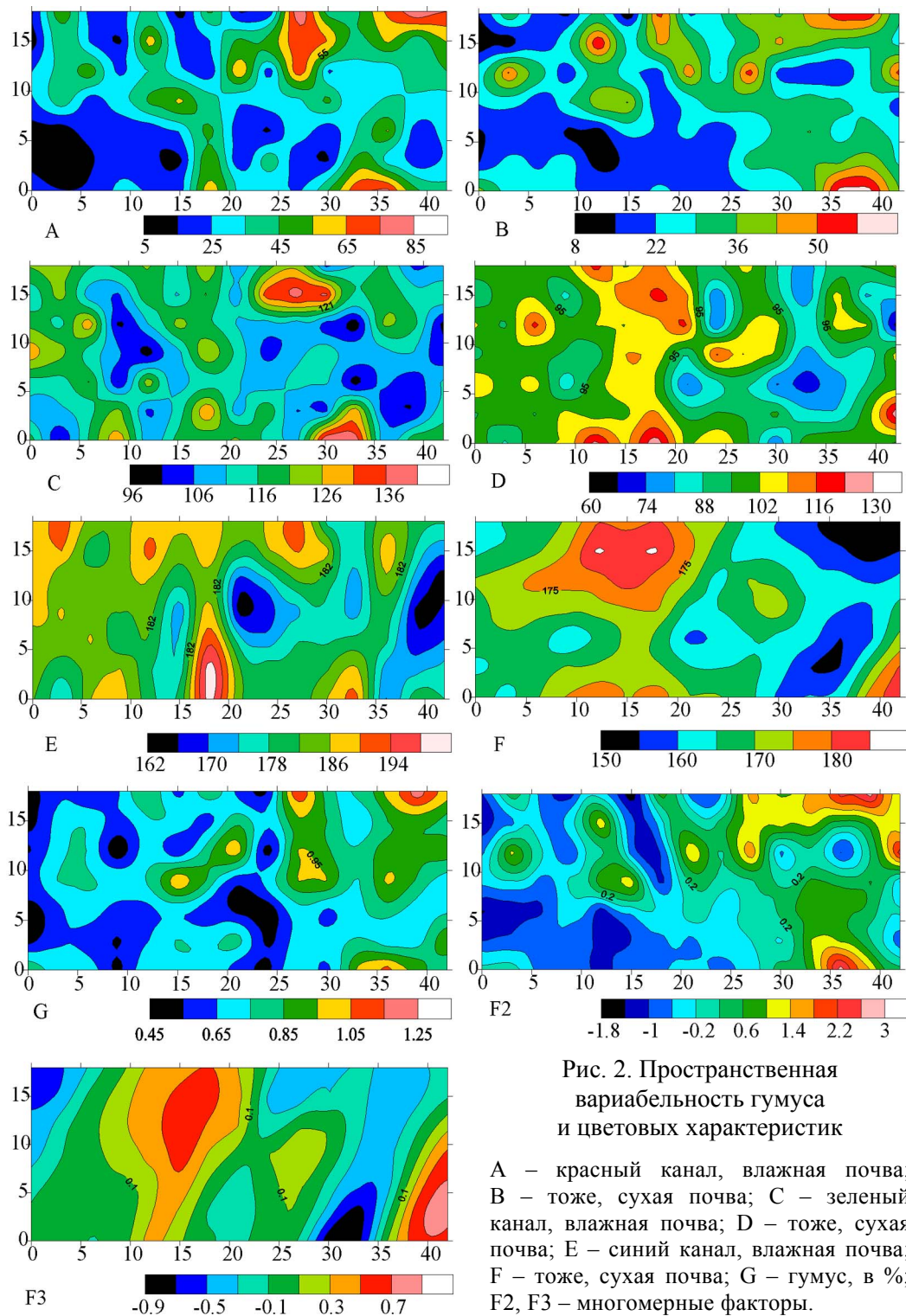


Рис. 2. Пространственная вариабельность гумуса и цветовых характеристик

А – красный канал, влажная почва; В – тоже, сухая почва; С – зеленый канал, влажная почва; D – тоже, сухая почва; E – синий канал, влажная почва; F – тоже, сухая почва; G – гумус, в %; F2, F3 – многомерные факторы.

Анализ полученных результатов позволяет выявить пространственно-обособленные локусы, которые характеризуются подобным содержанием гумуса и цветовых свойств. Эти локусы имеют сложную конфигурацию, но можно выделить общую закономерность: в восточной части содержание гумуса наименьшее, а в северо-восточном направлении этот показатель увеличивается. Аналогичной закономерности подчинятся пространственная изменчивость интенсивности в красном канале.

Пространственные паттерны интенсивности цветовых каналов влажной и сухой почвы характеризуется некоторым подобием. Тем не менее, между ними нет полной конгруэнции, что свидетельствует о различной информационной ценности цвета почвы в градиенте влажности.

Геостатистические показатели, которые описывают пространственное варьирование цветовых характеристик и содержания гумуса, подтверждают близость и подобие соответствующих пространственных паттернов. Так, радиусы влияния семивариограммы гумуса и цветовых каналов почвы очень близки и находятся в пределах 7,01–10,72 м (табл. 2).

Таблица 2

Геостатистические параметры пространственного размещения гумуса и цветовых характеристик дерново-литогенных почв на красно-бурых глинах (сферическая модель)

Показатель	C_0 (Наггет)	C_1 (Частичный порог)	C_0+C_1 (Порог)	SDL, %	Радиус влияния, м
Гумус	0,01	0,03	0,04	25,11	7,01
Красный канал (w)	61,46	264,30	325,76	18,87	9,15
Красный канал (d)	53,80	77,00	130,80	41,13	6,12
Зеленый канал (w)	56,26	44,04	100,30	56,09	6,17
Зеленый канал (d)	92,96	60,00	152,96	60,77	8,47
Синий канал (w)	182,80	106,90	289,70	63,10	9,24
Синий канал (d)	134,20	100,20	234,40	57,25	10,72
F1	0,91	0,11	1,02	89,22	11,70
F2	0,02	0,69	0,71	2,47	6,95
F3	0,75	0,31	1,06	70,79	19,50

Примечание к таблице. SDL – уровень пространственной зависимости (spatial dependence level) ($100 * C_0 / (C_0 + C_1)$).

Геостатистические параметры позволяют оценить вклад пространственных факторов в изменчивость фитомассы и проективного покрытия. Наггет-эффект указывает на значимость непространственной компоненты изменчивости признака. Совместный учет частичного порога (пространственной компоненты изменчивости) и наггет-эффекта позволяет оценить уровень пространственной зависимости (показатель SDL, или пространственное отношение). Этот показатель изменяется от 0 до 100 %. Если пространственное отношение находится в пределах 0–25 %, то речь идет о сильной пространственной зависимости; если пространственное

отношение находится в пределах 25–75 %, то в таком случае пространственная зависимость переменной является умеренной; если пространственное отношение превышает 75 %, то переменная рассматривается как слабо пространственно зависимая [15].

Уровень пространственной компоненты изменчивости очень высок для гумуса и красного канала влажной почвы (SDL = 25,11 и 18,87 % соответственно), что говорит взаимосвязи причин пространственной изменчивости этих показателей. Пространственная компонента изменчивости других цветовых характеристик гораздо ниже и может быть охарактеризована как умеренная.

Умеренная пространственная компонента изменчивости может быть результатом сложной природы изменчивости признака, вследствие чего одна пространственная модель не может хорошо объяснить наблюдаемую дисперсию. Действительно, многомерный факторный анализ показал сложную природу, которая лежит в основе изменчивости интенсивностей цвета дерново-литогенных почв на красно-бурых глинах (табл. 3).

Таблица 3

Факторный анализ интенсивности в цветовых каналах

Переменные	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 3
Влажная почва			
Синий	0,76	-0,22	-0,44
Зеленый	0,69	-0,06	-0,59
Красный	0,51	0,76	-0,10
Сухая почва			
Синий	0,68	-0,25	0,56
Зеленый	0,65	-0,35	0,51
Красный	0,25	0,86	0,30
Объясненная дисперсия			
Собственные числа	2,28	1,54	1,23
Доля от общей дисперсии, %	37,97	25,66	20,50

Первые три фактора, собственные числа которых превышают единицу, описывают 84,13 % суммарной дисперсии интенсивностей цветовых каналов. С фактором 1 коррелируют все признаки, поэтому его можно интерпретировать как яркость почвенных образцов. С фактором 2 позитивно коррелируют интенсивности в красном канале и негативно – в зеленом и синем. Фактор 3 чувствителен к влажности – он отражает различия в цвете при изменении влажности образцов. Все цветовые каналы характеризуется высокой корреляцией с двумя или тремя из выделенных факторов, что является подтверждением тезиса о сложной природе изменчивости цвета техноземов.

Геостатистические характеристики показывают, что фактор 1 является слабо пространственно зависимым, фактор 2 – сильно пространственно зависимым, фактор 3 – умеренно пространственно зависимым. Таким образом, компоненты изменчивости интенсивности цветовых каналов, или многомерные факторы,

отражают сложный характер формирования цвета технозема, который также имеет различную пространственную компоненту изменчивости. Фактор 2, связанный с изменчивостью красного канала, обладает наибольшей пространственной составляющей изменчивости.

Данные о взаимосвязи между цветовыми характеристиками техноземов и их эдафическими свойствами представлены в таблице 4.

Анализ полученных результатов свидетельствует о том, что во влажном состоянии с концентрацией гумуса коррелирует интенсивность в красном канале ($r=0,69$). В сухой почве корреляция этих параметров снижается ($r=0,57$), но наблюдается корреляция концентрации гумуса с интенсивностью в зеленом канале ($r=0,20$).

Таблица 4

Корреляция интенсивности цветовых каналов и свойств дерново-литогенных почв на красно-бурых глинах (показаны только достоверные коэффициенты корреляции на уровне значимости $p<0,05$)

Свойства	Цветовые каналы						Многомерные факторы		
	Влажная почва			Сухая почва			F1	F2	F3
	B	G	R	B	G	R			
Содержание гумуса и физические свойства технозема									
Гумус, %	–	–	0,69	–	0,20	0,57	0,25	0,62	0,21
МГВ	–0,30	–0,26	–	–	–0,36	–	–0,29	0,31	–
Усадка, %	–0,22	–	–	–0,31	–0,32	–	–	–	–0,16
ЕС, дСм/м	–0,26	–	–	–	–	0,20	–	0,27	–
Агрегатная структура, размер фракции в мм									
>10	–	–	–	–	–	–	–	–	–
7–10	–	–	–	–0,31	–0,37	–	–0,24	0,25	–
5–7	–0,27	–0,20	–	–0,26	–0,31	0,25	–0,27	0,34	–
3–5	–	–	–	–	–0,20	–	–	0,22	–
2–3	–	–	–	0,22	–	–	0,23	–	–
1–2	–	–	–	0,19	0,30	–0,25	–	–0,33	–
0,5–1	–	–	–	0,11	0,16	–0,05	–	–	–
0,25–0,5	–	–	–0,21	–	0,19	–0,22	–	–0,31	–
<0,25	0,21	–	–	–	0,25	–	–	–0,28	–
Твердость почвы на глубине, см									
0–5	–	–	–0,21	–	–	–0,23	–	–0,28	0,13
5–10	–	–	–0,20	0,19	–	–	–	–0,26	0,19
10–15	–	–	–	–	–	–	–	–	0,10
15–20	–	–	–	0,20	0,23	–	–	–	0,21
20–25	–	–	–	0,22	–	–	–	–	–
25–30	–	–	–	0,19	–	–	–	–	–
30–35	–	–	–	–	–	–	–	–	–
35–40	–	–	–	–	–	–	–	–	–
40–45	–	–	–	–	–	–	–	–	–
45–50	–	–	–	–	–	–	–	–	–

Во влажной почве интенсивность в синем и зеленом каналах достоверно коррелирует с гигроскопической влажностью. Интенсивность в синем канале также коррелирует с усадкой и электропроводностью почвы. Подобные закономерности наблюдаются также для спектральных зависимостей сухой почвы. Все перечисленные показатели являются функцией от гранулометрического состава почвы. Таким образом, интенсивность в красном канале в наибольшей степени отражает количество органического вещества в дерново-литогенных почвах на красно-бурых глинах, а интенсивность в синем и зеленом каналах – изменчивость свойств почвы, связанных с ее гранулометрическим составом.

В свою очередь, агрегатообразование почвы зависит как от органического вещества, так и от гранулометрического состава. Склеивающими свойствами, которые оказывают влияние на образование почвенных агрегатов, обладают такие неорганические вещества, как гипс и карбонаты. Высокое их содержание характерно для техноземов Никопольского марганцеворудного бассейна [3]. Эти компоненты индицируются по электропроводности почвы и ее усадке. Большой уровень засоления почвы приводит к увеличению ее электропроводности и усадке при высыхании.

Следует отметить, что измерение спектральных свойств почвы проводилось после разрушения ее агрегатной структуры. Корреляцию цветовых свойств почвенной пасты и агрегатной структуры, изученной по образцам из поля, следует рассматривать как оценку потенциала агрегатообразования по цветовым характеристикам.

Во влажном состоянии цвет почвы не несет большого количества информации о ее потенциале агрегатообразования. Лишь отдельные агрегатные фракции коррелируют с цветовыми характеристиками во влажном состоянии (всего 4 достоверных коэффициента корреляции из 27 возможных). В сухом состоянии почва в своем цвете несет гораздо больше информации о ее способности формировать агрегатную структуру. Снижение интенсивности в синем и зеленом каналах при увеличении в красном канале, что визуальнo будут проявляться как покраснение почвы, свидетельствует о тенденции увеличения агрегатов размерами от 3 до 10 мм. Обратная тенденция, что визуальнo проявляется как посерение почвы, будет приводить к увеличению агрегатов от 0,25 до 2 мм. При описании почвенных разрезов отмечается, что явления засоления почв наблюдаются при подсыхании стенки почвенного разреза в виде белесых или блестящих на солнце кристалликов соли. Очевидно, такой механизм объясняет причину большей информационной ценности цветовых свойств почвы в сухом состоянии, чем во влажном, для индикации потенциала агрегатообразования засоленных почв, к числу которых относятся дерново-литогенные почвы на красно-бурых глинах.

Многомерные факторы как интегральные характеристики цветовых свойств техноземов также несут информацию об эдафических свойствах. Фактор 1, который был определен как общая цветовая интенсивность, коррелирует с содержанием гумуса, гигроскопической влажностью и содержанием агрегатных фракций (негативная корреляция с содержанием агрегатов размером 5–7 и 7–10 мм и позитивная корреляция с агрегатами размером 2–3 мм). Фактор 2, который

характеризуется противоположным изменением интенсивности в красном канале с одной стороны и в синем и зеленом – с другой, несет большое количество информации о таких свойствах, как содержание гумуса, гигроскопическая влажность, электропроводность, агрегатная структура и твердость до глубины 10 см. Фактор 3 (цветовые различия почвы при высыхании) также связан с содержанием гумуса, усадкой и твердостью почвы до глубины 20 см.

Полученный результат наталкивает на мысль о различной информационной ценности данных дистанционного зондирования Земли в различные сезоны. Ранней весной, до появления растительного покрова, когда сошел снег и насыщение почвы влагой максимальное, наиболее благоприятный период для оценки пространственной изменчивости гумуса в почвах, в том числе и техноземах. В конце лета – в начале осени, когда насыщение влагой почвы наименьшее, а растительный покров «выгорел», данные дистанционного зондирования будут лучше отражать пространственную изменчивость засоления и потенциал агрегатообразования техноземов либо других засоленных почв.

Связь твердости почвы с цветовыми характеристиками обусловлена влиянием на твердость таких показателей, как содержание влаги, количество органики, механический состав и агрегатная структура [9] Как и в случае со структурой, для оценки твердости почвы более информативными являются спектральные характеристики сухой почвы. По цвету почвы можно получить информацию об изменении твердости приповерхностных почвенных горизонтов. Информацию о твердости более глубоких горизонтов можно получить ввиду корреляции твердости по профилю. Если вертикальная изменчивость твердости имеет более сложный характер, чем монотонное увеличение (уменьшение), то мониторинг поверхности в видимом диапазоне не дает возможности оценить пространственную изменчивость соответствующего показателя.

Для того, чтобы установить связь между содержанием гумуса и цветовыми характеристиками почвы был проведен регрессионный анализ (общая линейная модель). В качестве предикторов использовались данные об интенсивности в цветовых каналах (континуальные переменные) и дискретная переменная, которая отражает уровень влажности (влажная почва (34–35 %) и воздушно–сухая почва). Также в качестве предикторов использовались производные переменные, такие как вторые степени исходных данных об интенсивности и их попарные произведения. Таким образом, зависимость между гумусом и цветовыми характеристиками почвы мы моделировали уравнением вида:

$$H = const + a_1 R + a_2 G + a_3 B + a_4 R^2 + a_5 G^2 + a_6 B^2 + a_7 RB + a_8 RG + a_9 GB + a_{10} W,$$

где H – содержание гумуса, R , G , B – интенсивность в красном, зеленом и синем каналах соответственно, W – уровень влажности; $const$ и $a_1...a_{10}$ – регрессионные коэффициенты.

Анализ сводится к определению регрессионных коэффициентов и их значимости. Результаты анализа приведены в таблице 5.

Полученная регрессионная модель позволяет описать 52 % изменчивости изучаемого показателя ($R^2=0,52$). Из линейных компонент регрессионной модели

значимым коэффициентом характеризуется интенсивность в красном канале. Значимыми являются компоненты второй степени, а также коэффициент при произведении интенсивности в голубом и зеленых каналах. При линейном изменении интенсивности цветовых каналов изменяется тональность при том же цвете, либо цвет изменяется постепенно.

Таблица 5

Регрессионный анализ зависимости содержания гумуса от цветовых характеристик дерново-литогенных почв на красно-бурых глинах

Переменная	Коэф-фициент	t-значение	p-уровень	-95 %	+95 %	Beta*	-95 %	+95 %
Константа	-8,66E-01	-1,80	0,07	-1,81	0,08	-	-	-
B	1,21E-02	1,73	0,09	0,00	0,03	1,81	-0,25	3,88
G	7,90E-03	1,34	0,18	0,00	0,02	0,96	-0,45	2,37
R	5,85E-02	2,66	0,01	0,02	0,10	0,69	0,18	1,21
B^2	-9,07E-05	-2,76	0,01	0,00	0,00	-4,80	-8,23	-1,37
G^2	-1,44E-04	-2,80	0,01	0,00	0,00	-3,73	-6,36	-1,10
R^2	1,07E-02	4,37	0,00	0,01	0,02	1,50	0,82	2,18
B*G	1,70E-04	2,36	0,02	0,00	0,00	6,01	0,99	11,02
B*R	-2,18E-04	-0,67	0,50	0,00	0,00	-0,56	-2,22	1,09
G*R	-7,33E-04	-1,53	0,13	0,00	0,00	-1,24	-2,84	0,36
Влажность	-1,96E-02	-2,50	0,01	-0,04	0,00	-0,16	-0,29	-0,03

Примечания к таблице. * – стандартизированный коэффициент.

Нелинейность поведения цветовых каналов соответствует значительным изменениям цвета объекта. Нелинейность также может быть континуальным выражением дискретности объектов. Иначе говоря, можно предполагать наличие обособленных по цвету участков дерново-литогенных почв на красно-бурых глинах, которые будут также различаться по своим эдафическим свойствам.

Более простые линейные регрессионные модели для различных уровней увлажнения почвы также оказываются весьма результативными (табл. 6).

Результаты регрессионного анализа свидетельствуют о том, что прогностические способности моделей выше для влажной почвы (модель описывает 54 % дисперсии, тогда как для сухой почвы этот показатель 46 %). Для влажной почвы ведущими предикторами содержания гумуса являются интенсивности в красном и синем каналах, тогда как для сухой почвы роль красного канала снижается, но статистически значимым становится влияние зеленого канала. Как для сухой почвы, так и для влажной, с содержанием гумуса положительно коррелирует интенсивность в красном канале, а негативно – в синем.

Применение многомерных факторов в качестве предикторов позволяет получить модель, которая описывает 49 % дисперсии содержания гумуса. Все факторы характеризуются значимыми регрессионными коэффициентами. Если учесть, что все факторы являются ортогональными (независимыми), то полученная модель подчеркивает сложный характер связи между цветовыми характеристиками технозема и содержанием в нем гумуса.

Таблица 6

Регрессионный анализ зависимости содержания гумуса от цветовых характеристик дерново-литогенных почв на красно-бурых глинах (отдельно для влажной и сухой почвы)

Переменная	Beta*	Ст. ошибка	Коэф-фициент	Ст. ошибка	t-значение	p-уровень
Влажная почва ($R^2=0,54$, $F(3,101)=41,06$, $p<0,00$)						
Коэффициент	–	–	1,15	0,18	6,47	0,00
B	-0,23	0,09	0,00	0,00	-2,64	0,01
G	-0,08	0,09	0,00	0,00	-0,86	0,39
R	0,77	0,07	0,01	0,00	10,91	0,00
Сухая почва ($R^2=0,46$, $F(3,101)=29,05$, $p<0,00$)						
Коэффициент	–	–	0,52	0,17	3,15	0,00
B	-0,41	0,10	-0,01	0,00	-4,06	0,00
G	0,49	0,10	0,01	0,00	4,98	0,00
R	0,66	0,08	0,01	0,00	8,72	0,00
Многомерные факторы ($R^2=0,49$, $F(3,101)=32,79$, $p<0,00$)						
Коэффициент	–	–	0,73	0,02	48,44	0,00
F1	0,25	0,07	0,05	0,02	3,59	0,00
F2	0,62	0,07	0,13	0,02	8,75	0,00
F3	0,21	0,07	0,05	0,02	3,00	0,00

Кластерный анализ (рис. 3, А) позволил выявить три группы почвенных образцов, дискретность которых подтверждена с помощью дискриминантного анализа (рис. 3, В).

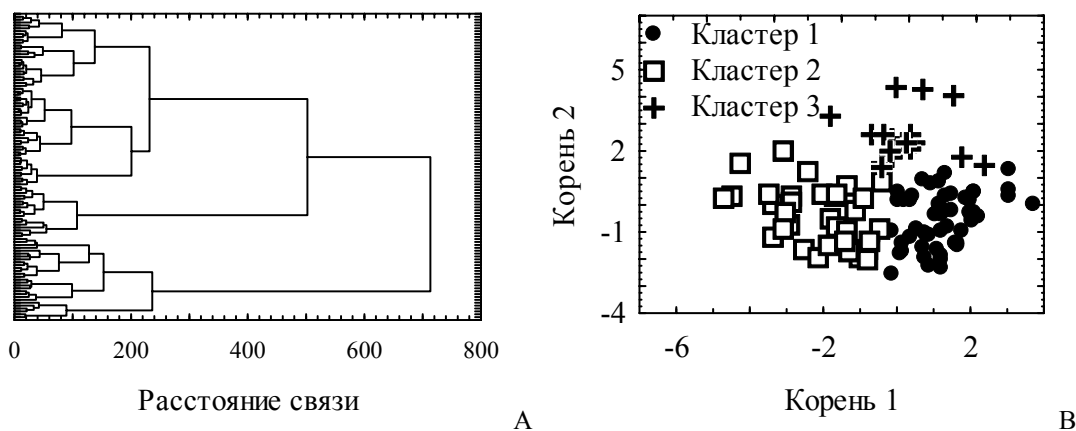


Рис. 3. Кластерный (А) и дискриминантный (В) анализы почвенных образцов по цветовым характеристикам

Расположение почвенных образцов в пространстве дискриминантных канонических переменных формирует три четко обособленных облака, что является

свидетельством их дискретности. Природу канонических переменных можно выявить на основе анализа их корреляционных отношений с интенсивностями в различных цветовых каналах (табл. 7). Каноническая переменная 1 отражает изменчивость общей интенсивности окраски почвенных образцов, так как характеризуется коэффициентами корреляции

Таблица 7

Корреляция переменных и канонических корней

Цветовой канал	Корень 1	Корень 2
Синий (w)	-0,58	-0,35
Зеленый (w)	-0,69	-0,36
Красный (w)	-0,52	0,68
Синий (d)	-0,27	-0,16
Зеленый (d)	-0,14	-0,23
Красный (d)	-0,22	0,63

одного знака со всеми цветовыми показателями, как сухой, так и влажной почвы. Каноническая переменная 2 позитивно коррелирует с интенсивностью в красном канале, как для влажной почвы, так и для сухой, и негативно коррелирует с прочими цветовыми показателями. Эта каноническая переменная отражает тренд изменчивости цвета от красного к серому.

Цветовые кластеры маркируют участки почвенного покрова, которые отличаются своими свойствами (табл. 8). В таблице представлены только те свойства, которые достоверно различаются в зависимости от цветового кластера.

Таблица 8

Дисперсионный анализ зависимости эдафических свойств от цветовых кластеров

Свойства	Сумма квадратов эффекта	Средняя сумма эффекта	Сумма квадратов ошибки	Средняя сумма ошибки	F-уровень	p-уровень
Эдафические свойства						
Гумус	0,97	0,49	3,80	0,04	13,06	0,00
Агрегаты 7–10 мм	40,79	20,40	715,93	7,02	2,91	0,05
Агрегаты 5–7 мм	120,15	60,08	1462,71	14,34	4,19	0,02
Твердость на глубине 0–5 см	8,08	4,04	105,32	1,03	3,91	0,02
Гигроскопическая влажность	34,47	17,24	336,17	3,30	5,23	0,01
Фитоиндикационные оценки						
Влажность	0,50	0,25	2,95	0,03	8,69	0,00
Засоление	1,93	0,96	9,25	0,09	10,62	0,00
Кислотность	1,08	0,54	5,95	0,06	9,24	0,00
Трофность	0,35	0,17	2,33	0,02	7,61	0,00
Степанты	0,02	0,01	0,19	0,00	4,33	0,02
Пратанты	0,05	0,02	0,26	0,00	9,49	0,00

На рисунке 4 представлена изменчивость эдафических свойств технозема в зависимости от цветовых кластеров.

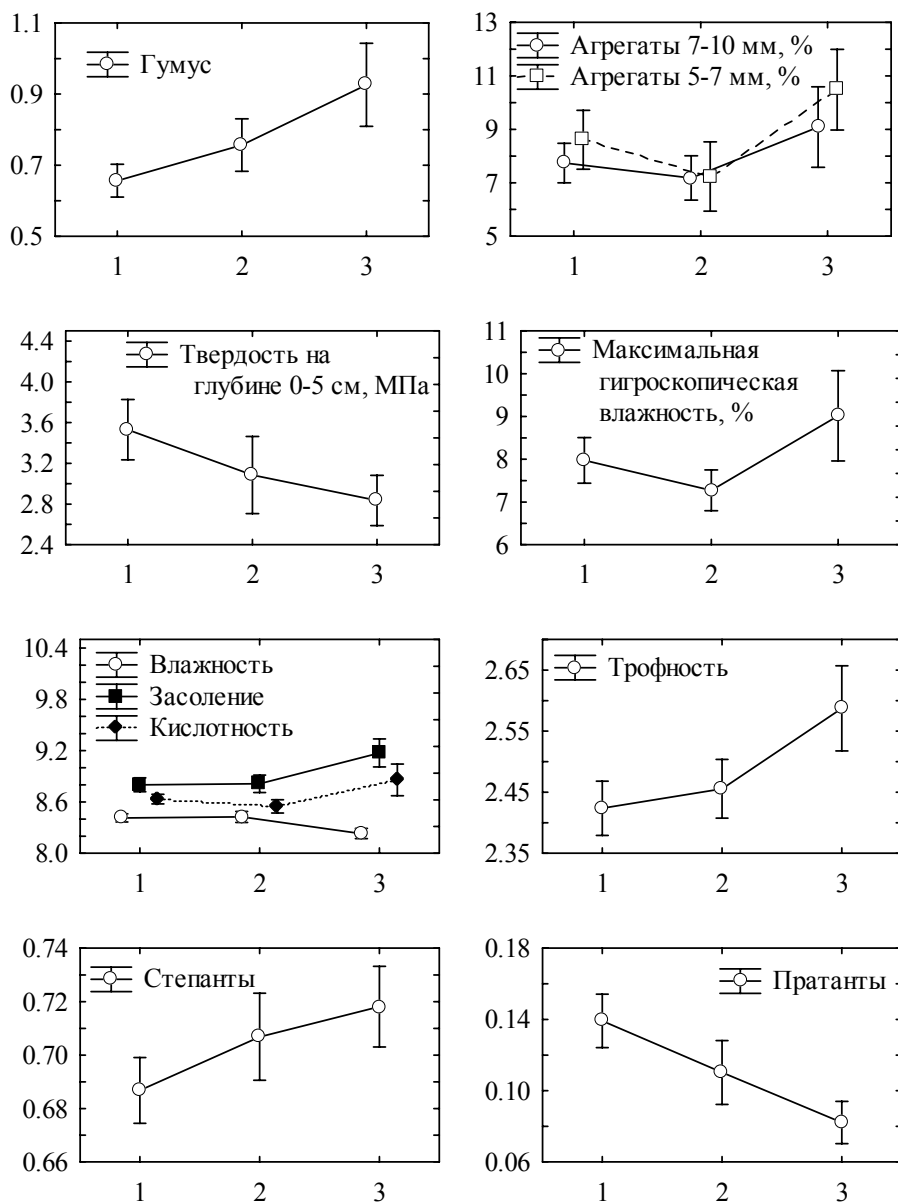


Рис. 4. Изменчивость эдафических свойств дерново-литогенных почв на красно-бурых глинах в зависимости от цветных кластеров

Анализ данных, приведенных на рисунке, показывает, что цветные кластеры 1–3 можно ранжировать в порядке возрастания количества гумуса в образцах почвы, которые соответствуют этим кластерам. Сопоставление этих сведений с информацией, полученной с помощью дискриминантного анализа, позволяет

выявить динамику изменения цветовых характеристик почвы при увеличении содержания гумуса.

При увеличении содержания гумуса, что отмечается при переходе от кластера 1 к кластеру 2, происходит увеличение интенсивности во всех цветовых каналах, что проявляется в общем увеличении насыщенности цвета. Дальнейшее увеличение количества гумуса от кластера 2 к кластеру 3 связано с увеличением яркости преимущественно красного цвета. В этом состоит нелинейность взаимозависимости цвета и количества гумуса в дерново-литогенных почвах на красно-бурых глинах.

Твердость почвы в горизонте 0–5 см изменяется в порядке обратном, выявленном для гумуса: наибольшей твердостью характеризуется цветовой кластер 1, а наименьшей – кластер 3.

По содержанию агрегатов размером 5–7 и 7–10 мм кластер 3 характеризуется наибольшими значениями, а кластер 1 – наименьшими. По прочим агрегатным фракциям цветовые кластеры достоверно не различаются. Подобная динамика характерна для гигроскопической влажности технозема.

Таким образом, кластеры, выделенные по цветовым характеристикам почвы, достоверно отличаются по ряду из исследованных эдафических признаков, которые играют важную роль в формировании экологических условий для существования растительных и животных организмов. Характер этого влияния был выявлен с помощью фитоиндикационного оценивания по Цыганову [14] и экоморфического анализа растительности по А. Л. Бельгарду [4].

По фитоиндикационным шкалам Цыганова достоверным различием между цветовых кластеров характеризовались такие эдафические факторы, как влажность, засоление (трофность) и кислотность. Наибольшей трюфностью и кислотностью и наименьшей влажностью характеризуется кластер 3. Фитоиндикационные оценки по Цыганову хорошо согласуются с результатами экоморфического анализа по А. Л. Бельгарду. По шкале трюфности кластер 3 характеризуется существенным превышением в сравнении с кластерами 1 и 2. В пределах кластера 3 доминируют степанты, тогда как в пределах кластеров 1 и 2 доля пратантов относительно высока.

Таким образом, категоризация почвенных образцов по цвету позволяет выделить относительно однородные участки почвенного покрова технозема, которые характеризуются как спецификой эдафических свойств, так и связанным с ними экологических условий.

Цветовые кластеры могут быть отображены в географическом пространстве (рис. 5).

Кластер 1 занимает 52,8 % территории экспериментального полигона, кластер 2–31,42, а кластер 3–16,19 % соответственно. Таким образом, основная часть исследованной территории занята кластером, который характеризуется низким (0,61–0,70 %) содержанием гумуса. Кластерам 1 и 2 присуща тесная пространственная сопряженность. Их близкое пространственное размещение сопровождается подобием некоторых свойств. Так, эти кластеры отличаются низкой долей в агрегатной структуре фракций размером 5–7 и 7–10 мм и пониженной

гигроскопической влажностью, что может быть результатом более легкого механического состава в сравнении с кластером 3.

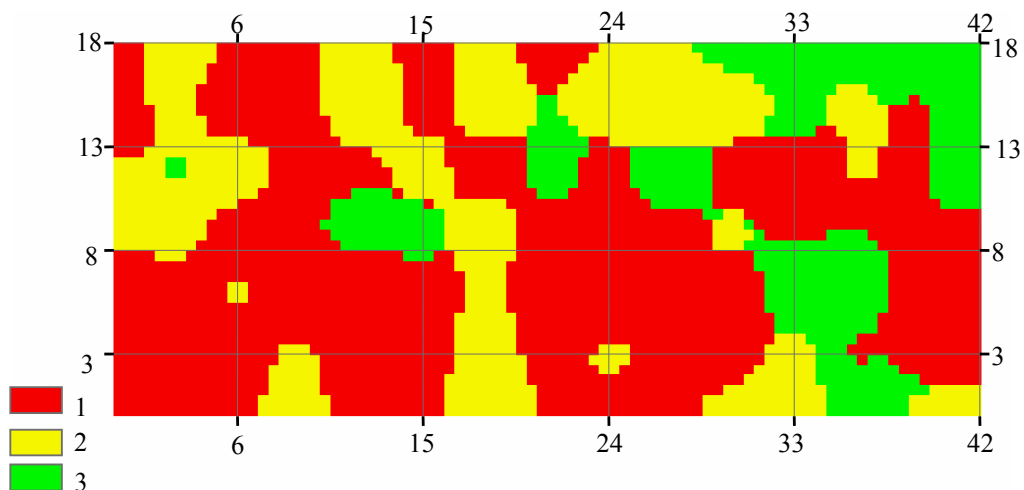


Рис. 5. Пространственное размещение цветковых кластеров в пределах экспериментального полигона

Цветовые свойства маркируют экологически различные участки почвенного покрова. В пределах всего полигона в структуре растительности доминируют степные виды растений (степанты по А. Л. Бельгарду), а луговые виды (пратанты) занимают подчиненное положение. Ареал кластера 1 отличается относительно большей представленностью луговых видов, среди которых существенную роль играют рудеральные формы. Напротив, кластер 3 обозначает участки, где снижается представленность пратантов, но увеличивается количество степантов. Соответственно, кластер 2 занимает переходное положение, как по свойствам, так и по пространственной конфигурации.

Полученный результат доказывает возможность использования цветовых свойств поверхностного слоя техноземов для крупномасштабного картографирования экологически релевантной неоднородности почвенного покрова.

ВЫВОДЫ

1. Статистическое распределение содержания гумуса и интенсивности красного канала в изученных образцах дерново-литогенных почв на красно-бурых глинах подчиняется гамма-закону. Интенсивность в синем и зеленом каналах подчиняется нормальному распределению.

2. В пределах изученного полигона радиусы влияния семивариограмм гумуса и цветковых каналов почвы очень близки и находятся в пределах 7,01–10,72 м. Гумус и красный канал влажной почвы характеризуются сильной пространственной зависимостью.

3. Компоненты вариабельности интенсивности цветowych каналов, установленные с помощью многомерного факторного анализа, отражают сложный характер формирования цвета технозема, который также имеет различную пространственную компоненту изменчивости. Фактор 2, связанный с интенсивностью красного канала, обладает наибольшей пространственной составляющей изменчивости и является наиболее информативным для описания содержания гумуса в техноземе.

4. Интенсивность в красном канале наиболее чувствительна к содержанию гумуса в техноземе, а в синем и зеленом – к гигроскопической влажности, усадке, электропроводности, агрегатной структуре.

5. Прогностические способности регрессионной модели выше для влажной почвы, чем для сухой. Для влажной почвы ведущими предикторами содержания гумуса являются интенсивности в красном и синем каналах, тогда как для сухой почвы роль красного канала снижается, но статистически значимым становится влияние зеленого канала. Как для сухой почвы, так и для влажной, с содержанием гумуса положительно коррелирует интенсивность в красном канале, а негативно – в синем.

6. Категоризация почвенных образцов по цвету позволяет выделить относительно однородные участки почвенного покрова технозема, которые характеризуются как спецификой эдафических свойств, так и связанными с ними экологическими условиями. Полученный результат доказывает возможность использования цветowych свойств поверхностного слоя техноземов для крупномасштабного картографирования экологически релевантной неоднородности почвенного покрова.

Список литературы

1. Андрусевич К. В. Количественная оценка цветowych свойств дерново-литогенных почв на краснобурых глинах участка рекультивации Никопольского марганцеворудного бассейна / К. В. Андрусевич, А. В. Жуков, Г. А. Задорожная, О. Н. Осадчук // III Международная конференция, посвященная 25-летию биологического факультета «Современные проблемы биологии, экологии и химии»: 11–13 мая 2012 г.: тез. доп. – Запорожье, 2012. – С. 378.
2. Ачасов А. Б. Використання цифрових фотокамер для визначення вмісту гумусу в ґрунті / А. Б. Ачасов, Р. В. Терновий // Вісник ХНАУ. Сер. «Ґрунтознавство, агрохімія, землеробство, лісове господарство». –2006. – № 6. – С. 94–96.
3. Бекаревич Н. Е. Водопрочность почвенной структуры и определение ее методами агрегатного анализа / Н. Е. Бекаревич., Н. Б. Кречун // Сборник работ по методике исследований в области физики почв. – Л.: Госбытгиздат, 1964. – С. 86–95.
4. Бельгард А. Л. Лесная растительность юго-востока УССР / А. Л. Бельгард. – Киев: Изд-во Киевского гос. ун-та, 1950. – 294 с.
5. Булигін С. Ю. Визначення вмісту гумусу в ґрунті неконтактними методами / С. Ю. Булигін, О. О. Опришко, Н. А. Гайбура, Д. І. Бідолах // Вісник аграрної науки. – 2005. – № 4. – С. 34–37.
6. Вадюнина А. Ф. Методы исследования физических свойств почв / А. Ф. Вадюнина, З. А. Корчагина. – М.: Агропромиздат, 1986. – 416 с.
7. Колбасин А. А. Современное состояние и перспективы рекультивации нарушенных земель: масштабы и динамика процесса / А. А. Колбасин // Эколого-биологические и социально-экономические основы сельскохозяйственной рекультивации в степной черноземной зоне УССР: Тр. ДСХИ. – Днепропетровск, 1984. – Т. 49. – С. 3.

8. Костенко И. В. Изучение оптических свойств образцов дерново-степных песчаных почв юга Украины при помощи сканера / И. В. Костенко // Почвоведение. – 2009. – № 9. – С. 1090–1098.
9. Медведев В. В. Твердость почв / В. В. Медведев. – Харьков: Городская типография, 2009. – 152 с.
10. Пузаченко Ю. Г. Анализ строения почвенного профиля на основе цифровой цветной фотографии / Ю. Г. Пузаченко, М. Ю. Пузаченко, Д. Н. Козлов, Г. М. Алещенко // Почвоведение. – 2004. – № 2. – С. 133–146.
11. Розанов Б. Г. Морфология почв / Б. Г. Розанов. – М.: МГУ, 2004 – 432 с.
12. Савин И. Ю. Спектральная отражательная способность красноцветных почв Сирии / И. Ю. Савин, В. С. Столбовой. – Почвоведение. – 1998. – № 4. – С. 427–434.
13. Тарасов В. В. Флора Дніпропетровської та Запорізької областей. – Дніпропетровськ: Вид-во Дніпропетровського національного університету, 2005. – 276 с.
14. Циганов Д. Н. Фитоиндикация экологических режимов в подзоне хвойно-широколиственных лесов / Д. Н. Циганов. – М.: Наука, 1983. – 197 с.
15. Cambardella C. A. Field scale variability of soil properties in central Iowa soils / C. A. Cambardella, T. V. Moorman, J. M. Novak et al. // Soil Science Soc. Am. – 1994. – Vol. 58. – P. 1501–1511.

Жуков О. В., Задорожна Г. О., Андрусевич К. В., Тур В. В. Застосування спектральних характеристик для оцінки просторової неоднорідності екологічних властивостей дерново-літогенних ґрунтів на червоно-бурих глинах // Екосистеми, їх оптимізація та охорона. Сімферополь: ТНУ, 2013. Вип. 8. С. 154–172.

Вивчено можливість оцінювання едафічних властивостей дерново-літогенних ґрунтів на червоно-бурих глинах за їх кольоровими особливостями. Категоризація ґрунтових зразків за оптичними характеристиками дозволила виділити відносно однорідні ділянки ґрунтового покриву технозему, які характеризуються як специфікою едафічних властивостей, так і пов'язаними з ними екологічними умовами. Отриманий результат свідчить про можливість використання кольорових властивостей поверхневого шару техноземів для великомасштабного картографування екологічно релевантної неоднорідності ґрунтового покриву.

Ключові слова: колір ґрунту, рекультивация, інтенсивність кольорових каналів, едафічні властивості.

Zhukov A. V., Zadorojhnaya G. A., Andrusевич E. V., Tur V. V. The usage of spectral characteristics for estimation spatial heterogeneity of ecological properties of the sod-lithogenic soil on the red-brown clays // Optimization and Protection of Ecosystems. Simferopol: TNU, 2013. Iss. 8. P. 154–172.

The possibility of estimating edaphic properties of sod-lithogenic soils on red-brown clays on their color characteristics has been studied. Clusterisation of soil samples on the basis of optical properties lets to identify relatively homogeneous areas of soil technozem which characterized by specific edaphic properties and related environmental conditions. This result proves the possibility of using the color properties of the technozem surface layer for large-scale mapping of environmentally relevant heterogeneity of soil cover.

Key words: soil color, reclamation, the intensity of the color channels, edaphic properties.

Поступила в редакцію 11.06.2013 г.