

УДК 631.471

СВЯЗЬ ЦВЕТА ПОДПОВЕРХНОСТНЫХ ГОРИЗОНТОВ ПОЧВ С ДАННЫМИ ГЕОРАДАРНОГО ПРОФИЛИРОВАНИЯ

© 2020 г. А. Я. Воронин^а, И. Ю. Савин^{а, б, *}^аПочвенный институт им. В.В. Докучаева, Пыжевский пер., 7, стр. 2, Москва, 119017 Россия^бАграрно-технологический институт РУДН, ул. Миклухо-Маклая, 6, Москва, 117198 Россия

*e-mail: savin_iyu@esoil.ru

Поступила в редакцию 29.10.2019 г.

После доработки 25.02.2020 г.

Принята к публикации 27.02.2020 г.

Проведен анализ связи цветовых показателей сухих образцов почв с параметрами, полученными при георадарном профилировании. Такими параметрами явились данные спектрального преобразования Фурье амплитуды отраженного импульса в подповерхностной среде почв Каменной степи. Георадиолокационное профилирование проводили геофизическим прибором “Лоза-В”. Установлены точки дифракции амплитуды отраженного импульса, соответствующие локальным почвенным горизонтам и поверхности грунтовых вод. Изменчивость мощности горизонтов и слоев рассчитывали через модули амплитудных максимумов с учетом проводимости горизонта (диэлектрическая проницаемость и скорость прохождения сигнала в данной среде). Процедура верификации дифференциации точек зондирования базировалась на сравнении их с реальными почвенными профилями и цветовыми шаблонами. Статистическая обработка включала расчет средних значений, стандартных отклонений и частот распределения амплитуды сигналов, использование метода главных компонент и кластерного анализа. Построены две полиномиальные модели связи изменений показателей спектрального преобразования Фурье электромагнитных импульсов в подповерхностной среде черноземов с атрибутивными показателями формирования спектральных чистых цветов доминирующей длины волны (λ_j). Такими показателями являются условный коэффициент чистого цвета (K_{λ_j}), который соответствует функциям сложения в трехцветной колориметрической системе Международной комиссии по освещению XYZ 1931 г., и его насыщенность, которая полностью определяется свойствами коэффициента отражения (ρ_r) в диапазоне длин волн 580–720 нм красной зоны видимого спектра R. Полученные на основе этих моделей расчетные параметры цветности почв явились прерогативой для построения модели RGB слоев почв и ее визуализации в графических редакторах.

Ключевые слова: радарограмма, спектральная плотность, спектральная отражательная способность, цветовая модель RGB

DOI: 10.31857/S0032180X2008016X

ВВЕДЕНИЕ

Цвет (окраска) является одним из основных свойств почв, который изначально и послужил основанием для их выделения в качестве специфического природного объекта. Именно поэтому наименования многих почв как в России, так и в других странах, связаны с цветом [8, 24]. Известно, что цвет любого объекта определяется спецификой отражения от него электромагнитных волн в видимом диапазоне спектра. В свою очередь специфика отражения предопределяется свойствами самого объекта и зависит от его вещественного состава. В многочисленных исследованиях показана связь цвета почв (их спектральной отражательной способности) с такими свойствами, как влажность, содержание и тип гумуса, гранулометрический состав, засоленность, плотность, солонцеватость, карбонатность, щелнистость, содер-

жание железа, оглеенность и др. [1, 7, 12, 22–24, 28, 29]. Цвет почв — является одним из интегральных показателей свойств и широко используется в диагностике почв, их классификации, определения тренда изменений и эволюции [6, 17]. Кроме того, на анализе цвета базируются морфологические, дистанционные, бесконтактные методы изучения почв [16, 30]. Самым простым методом оценки цвета и окраски почв является визуальное описание, которое может базироваться на специально разработанных шкалах цветов [5, 12, 13, 27]. Для более детальной количественной характеристики цвета почв используют спектрорадиометры и спектрофотометры, которые позволяют получить информацию о цвете почв в виде кривых спектральной отражательной способности [17]. В любом случае характеристика цвета горизонтов почвенного профиля (за исключением поверхности почв) до сих пор невозможна без вскрытия

почвенного разреза или бурения с извлечением образцов почвы на поверхность. Это предопределяет высокую трудоемкость изучения цвета профиля почв.

Теоретически для определения такого комплексного свойства почв, как цвет, можно использовать методы георадарного профилирования, которые в настоящий момент бурно развиваются, и которые позволяют получать информацию о профиле почв без вскрытия разреза. Принцип действия георадаров основан на зондировании электромагнитными импульсами земной поверхности на различную глубину и восстановлении картины раздела сред с различной диэлектрической проницаемостью по отраженному сигналу [10, 18]. В настоящее время накопилось много разработок по процедуре распознавания дифрагированных отражений электромагнитных волн на радарограммах, выделяющих границам почвенных горизонтов, выделения артефактов и др. [2, 3, 21, 26, 31]. Созданы серии полиномиальных моделей связи зондирующих импульсов с некоторыми диагностическими субстантивными показателями почв (содержанием илстой фракции, плотностью сложения, влажностью, гумусностью) [2, 3].

Целью наших исследований являлся анализ связи цветовых показателей слоев почв с параметрами, полученными при георадарном профилировании.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Объектами исследований являлись пахотные почвы природно-территориального комплекса НИИСХ ЦЧП им. В.В. Докучаева (заказник Каменная степь) Таловского района, Воронежской области. Каменная степь расположена на северных склонах Калачской возвышенности, на водоразделе балок Таловой и Озерки, впадающей в р. Чигла, приток Битюга и Дона.

Поверхность территории поднимается до 197 м абсолютной отметки. Над уровнем ближайшей р. Чигла поверхность возвышается до 90 м. Бассейну балки Таловой принадлежит около 10% всей площади с уклоном поверхности в восточном направлении. Эрозионная сеть представлена неглубокими плоскими ложбинами бассейна балок Таловая и Озерки. На водораздельных участках местами отмечаются замкнутые блюдцеобразные понижения, представляющие собой или реликты древнего рельефа, или просадки в лёссовидных породах. Для проведения георадарных исследований были выбраны водораздельные участки долины балки Таловой с максимальным наличием указанных особенностей.

Покровные суглинки слоем неравномерной мощности залегают на водораздельных участках описываемой территории. Верхнюю часть их составляют бурые или темно-бурые суглинки, плотные, иногда иловатые или оглеенные, почти все-

гда известковистые и перерытые кротовинами, достигающими большой глубины. Часто эти суглинки бывают разбиты морозобойными трещинами или трещинами усыхания [4]. Перекрыты они лёссовидными суглинками на поверхности которых сформировался современный почвенный покров. Мощность их колеблется от 1 до 3 м, увеличиваясь до 5 м на участках с более высокими отметками [4]. Литологическая смена пород привела к формированию карбонатных новообразований в форме белоглазки [19]. В пониженных участках мощность суглинков уменьшается, иногда они выклиниваются. Цвет лёссовидных суглинков желтовато-бурый, более осветленный за счет дополнительной аккумуляции на поверхности частиц выделений карбонатов кальция. На участках в структуре почвенного покрова преобладают пятнистости, компонентами которых являются черноземы обыкновенные, черноземы перерытые тяжелосуглинистого и глинистого гранулометрического состава (Haplic Chernozem (Agric, Clayic)) [19].

Георадиолокационное профилирование проводили в репрезентативных точках по двум трансектам протяженностью 200 и 1000 м, выбранных с учетом рельефа и почвенной карты. Всего для анализа было отобрано 7 точек. Характеристику почв в точках проводили по данным отобранных образцов глубокого бурения почвенным буром (до 350 см) на выбранных точках двух заложённых георадиолокационных профилей. Визуальное строение почвенных профилей представлено на рис. 1.

Географические координаты георадиолокационного профилирования определяли в поле прибором Garmin GPSmap 76CS (приборная точность определения координат 15 м). Координаты точек:

B1 05: 51°03'26.4" N, 40°44'55.4" E;

B1 126: 51°03'22.5" N, 40°44'53.9" E;

B1 200: 51°03'20.3" N, 40°44'53.1" E.

ОП1 100: 51°03'34.6" N, 40°44'51.6" E;

ОП1 300: 51°03'28.4" N, 40°44'49.8" E;

ОП1 450: 51°03'26.6" N, 40°44'47.4" E;

ОП1 950: 51°03'08.8" N, 40°44'42.4" E.

Профилирование на данной территории проводили георадаром "Лоза-В" с частотой 100 МГц. На каждой точке строили георадарный профиль протяженностью 5 м. Шаг георадарного зондирования – 0.5 м. Всего на каждой точке производили 10 измерений (кадров). Моделирование поверхности полученных амплитудных показателей отраженного сигнала осуществляли методом обратных расстояний второго порядка в программе Voxler 3 (<https://www.goldensoftware.com/products/voxler>).

Определение свойств почв до границы появления грунтовой воды в точках георадарного профилирования проводили для образцов, получен-

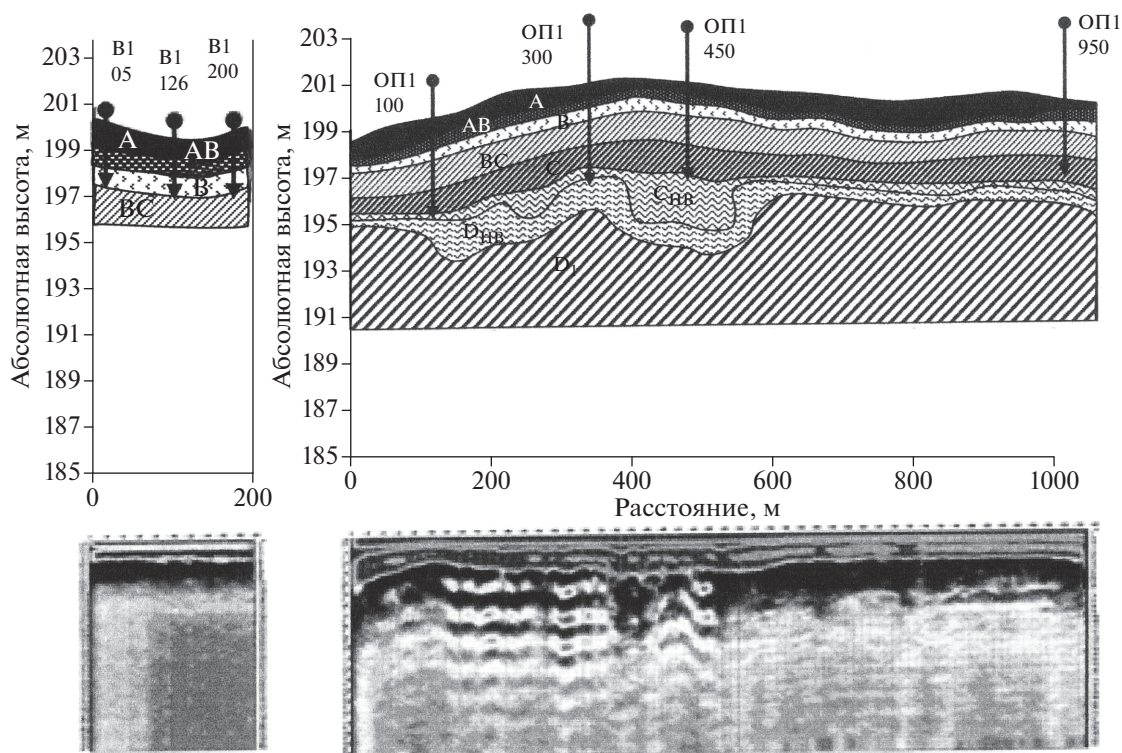


Рис. 1. Расположение точек обследования георадарного профилирования по элементам рельефа территории обследования.

ных бурением. Для каждой точки отбирали образцы почв по всему профилю с шагом в 10 см.

Схема обработки данных георадарного профилирования и данных спектральной отражательной способности почв для целей установления прогностической модели цветности подповерхностной среды почв представлена на рис. 2.

Анализ, обработку георадарного разреза и подготовку отчетного представления осуществляли в специализированной программе «КРОТ» [14, 15]. Режим цифровой фильтрации в этой программе реализован в двух опциях: вертикальной и горизонтальной одномерной фильтрации. Чтобы убрать случайные колебания, периодограммы предварительно сглаживали методом взвешенного скользящего среднего с использованием расстояния Хемминга, равного 10 [14].

Полученные первичные данные георадарного профилирования подвергли преобразованию Фурье в программе Statistica, в результате получен показатель спектральной плотности сигнала.

Статистическую обработку данных (расчет средних значений, стандартных отклонений, показателей вариабельности распределения амплитуды отраженных сигналов единичных временных рядов и радарограмм) проводили с использованием Excel 2007 и Statistica.

Рассчитывали корреляционные матрицы (метод главных компонент) связи распределения ам-

плитуды отраженных импульсов в подповерхностной среде длительностью 512 нс соседних георадарных временных рядов (кадров), а также проводили кластерный анализ, задачей которого являлось выделение групп временных рядов, имеющих общие свойства. Критерием для определения схожести и различий кластеров являлся расчет Евклидовых расстояний между рассматриваемыми объектами на диаграмме рассеивания.

Данные по спектральной отражательной способности почвенных образцов получали с помощью полевого спектрорадиометра FieldSpec Hand-Held 2, работающего в спектральном диапазоне 325–1025 нм [17]. Перед исследованием почвенных образцов высушивали при 103°C, растирали и просеивали на ситах 0.01 мм. Регистрацию спектральных кривых выполняли в пяти повторностях. Далее кривые использовали для характеристики цвета образцов, которая определялась его координатами цветности, доминирующей длиной волны, чистотой цвета и яркостью. Колориметрические характеристики соответствовали функциям сложения в трехцветной колориметрической системе Международной комиссии по освещению XYZ 1931 г. [9, 11]. В соответствии с этой системой доминирующая длина волны красного основного цвета находится в пределах 610–700 нм, зеленого – 520–540 нм, синего – 450–475 нм. Чистота цветов основных цветных излучений принята не менее

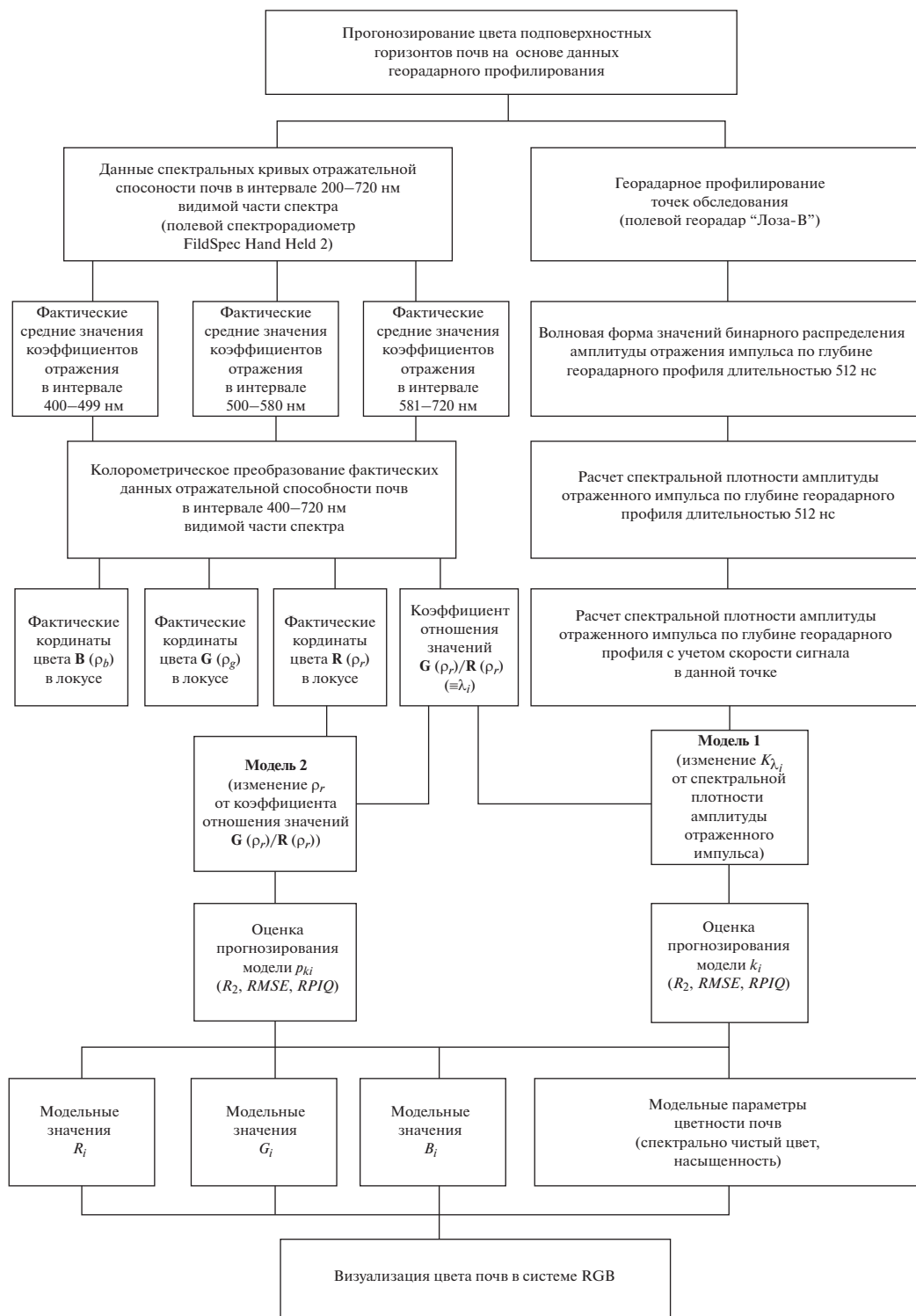


Рис. 2. Схема обработки данных георадарного профилирования и данных спектральной отражательной способности почв для целей установления параметров цветности поверхностных горизонтов почв.

0.85 [18]. Таким образом, в нашем эксперименте использовали данные о цвете сухих образцов почв.

При расчете доминирующих длин волн использовали коэффициент условного чистого цвета определенной длины волны (K_{λ_i}), рассчитан-

ный как отношение среднего значения коэффициентов отражения в области зеленого цвета (500–580 нм) к аналогичным коэффициентам в интервале красного цвета, а также отношение среднего значения коэффициентов отражения в

Таблица 1. Скорость распространения импульса (V , см/с, $\times 10^{-9}$) и диэлектрическая проницаемость (ϵ) черноземов (Haplic Chernozem (Aric, Clayic)) Каменной степи

| Показатель | Номер точки | | | | | | |
|------------|-------------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|
| | B1 05 | B1 126 | B1 200 | ОП1 100 | ОП1 300 | ОП1 450 | ОП1 950 |
| ϵ | 3.5 | 6.6 | 6.6 | 5.3 | 3.7 | 6.6 | 4.2 |
| V | 8.0 | 5.8 | 5.8 | 6.5 | 7.8 | 5.8 | 7.3 |

области синего цвета (400–500 нм) к аналогичным в области зеленого цвета. Также использовали представление информации о цвете в виде трехмерной системы координат RGB. Каждая координата отражает вклад соответствующей составляющей в конкретный цвет в диапазоне от нуля до максимального значения 255.

Алгоритм первичной обработки отраженных амплитуд импульсов включал: установку параметров георадарных профилей, цифровую фильтрацию данных, которая реализована в двух опциях вертикальной и горизонтальной одномерной фильтрации (фильтрация выполнялась по стандартной процедуре прямоугольным фильтром (скользящее среднее)), вычисление средней скорости распространения волны в грунте (табл. 1), автоматическую прорисовку границ слоев с разной диэлектрической проницаемостью.

Маску фильтра строили на основе одной или нескольких эмпирически установленных нами связей на исследуемых почвах между точкой матрицы диэлектрической проницаемости среды (ϵ) и одним или несколькими динамическими атрибутами: влажностью почв (% от веса), коэффициентом отражения света в красном диапазоне видимой части спектра и отношением коэффициентов в зеленом и красном интервалах видимого спектра. Интерпретацию результатов георадарного зондирования завершали преобразованием временного разреза радарограммы в глубинный.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Данные бурения и значения спектральной плотности отраженного импульса позволили выявить специфику залегания почвообразующих пород на территории исследований. Рассчитаны значения спектральной плотности отраженного сигнала, приведенные к стандартным описаниям черноземов [9]. Фактическое распределение этих данных по профилям почв более сложное (табл. 2).

Средние значения их в слое 0–50 см изменяются в пределах 1 тыс. с², $\times 10^{-9}$ плотности. Коэффициент вариации относительно высок – 25–70%. В карбонатно-иллювиальных горизонтах показатели спектральной плотности возрастают до 17 тыс. ед. Незначительно увеличивается и вариабельность (90%) внутри этого слоя, но изменчивость по отдельным разрезам достигает максимума – от 10 до 100%. Почвообразующие породы характеризуются стабильными, мало варьирующими

значениями спектральной плотности – 10–12 тыс. с², $\times 10^{-9}$ при коэффициенте вариации до 19%.

На рис. 3 приведены примеры кривых спектральной отражательной способности высушенных образцов почв в видимом диапазоне спектра электромагнитных волн.

Отмечается повышенная отражательная способность почв в длинноволновой области спектра во всех горизонтах почвенного профиля. Угол наклона отдельных отрезков кривых графиках варьирует в интервале 580–720 нм от 3° до 1°; 500–580 нм – от 12° до 1°; 400–500 нм – от 8° до 1°. Графики показывают, что при увеличении мощности лёссовидных суглинков (т. ОП1 100) в нижней части профиля на глубине 350 см появляется дополнительный слой с высокими значениями коэффициентов отражения в красной зоне спектра, обусловленных наличием бикарбонатов кальция.

Для почв пологих склонов и понижений выявлен только один аналогичный горизонт, соответствующий переходному горизонту от гумусового к аккумулятивно-карбонатному. Мощность лёссовидных суглинков, являющихся почвообразующими породами этих почв, значительно уменьшена. Покровные суглинки подходят ближе к поверхности, в которых коэффициенты отражения невысокие. Сравнение трендов цветовых оттенков почв водоразделов и склонов показывает их противоположную направленность. Измеренные данные отражательной способности почв представлены также в колориметрических координатах цвета.

Анализ методом главных компонент цветовых и геофизических параметров почв позволил установить их существенную связь между собой (табл. 4).

В точках ОП1 100 и ОП1 300 наблюдается существенный вклад в формирование спектральных чистых цветов (доминирующей длины волны (λ_i)) изменения условных коэффициентов чистого цвета (K_{λ_i}), за исключением параметров насыщенности цвета, где вклад коэффициентов отражения (ρ_i) в диапазоне 580–720 нм в вариабельность чистых спектральных цветов снижается до 70%. Но главное отличие этих точек от других – наличие отрицательной связи между (ρ_i) и (λ_i) – (–0.70...–0.83). Главным организующим параметром является глубина профилирования.

Вклад коэффициентов отражения света в интервале 580–720 нм, значений длины волны чистого

Таблица 2. Средние значения спектральной плотности отраженного импульса $c^2, \times 10^{-9}$ ($n = 5$)

| Глубина, см | Номер точки | | | | | | |
|-------------|-------------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|
| | В1 05 | В1 126 | В1 200 | ОП1 100 | ОП1 300 | ОП1 300 | ОП1 300 |
| 10 | 450 | 347 | 950 | 927 | 400 | 234 | 900 |
| 20 | 826 | 442 | 399 | 2198 | 428 | 549 | 762 |
| 30 | 768 | 767 | 571 | 2659 | 490 | 539 | 880 |
| 40 | 980 | 813 | 832 | 2456 | 541 | 900 | 1388 |
| 50 | 1030 | 1306 | 538 | 3478 | 567 | 1391 | 1456 |
| 60 | 1719 | 2010 | 2347 | 7067 | 583 | 2380 | 510 |
| 70 | 420 | 5466 | 3819 | 13210 | 594 | 5300 | 688 |
| 80 | 517 | 4173 | 4384 | 15571 | 603 | 4245 | 6700 |
| 90 | 1219 | 6427 | 5102 | 12686 | 609 | 6499 | 6744 |
| 100 | 1797 | 12237 | 10224 | 7256 | 614 | 6027 | 6106 |
| 110 | 2519 | 16353 | 14269 | 3321 | 618 | 6485 | 5311 |
| 120 | 3551 | 12823 | 15833 | 3004 | 621 | 8056 | 5669 |
| 130 | 5994 | 6787 | 13208 | 4254 | 624 | 7831 | 6573 |
| 140 | 11061 | 3980 | 8405 | 5374 | 627 | 5474 | 7847 |
| 150 | 14835 | 3529 | 6893 | 5500 | 629 | 6781 | 9895 |
| 160 | 19879 | 4803 | 6096 | 6929 | 7845 | 19524 | 13255 |
| 170 | — | — | — | 5905 | 5518 | 37933 | 20539 |
| 180 | — | — | — | 6929 | 3209 | 58141 | 22832 |
| 190 | — | — | — | 9421 | 1889 | 70147 | 23311 |
| 200 | — | — | — | 10000 | 2284 | 67401 | 22318 |
| 210 | — | — | — | 12759 | 5532 | 55000 | 20300 |
| 220 | — | — | — | 14000 | 12876 | 52129 | 17570 |
| 230 | — | — | — | 16197 | 24372 | 33022 | 15000 |
| 240 | — | — | — | 17000 | 36521 | 22000 | 14300 |
| 250 | — | — | — | 19323 | 44512 | 18821 | 10718 |
| 260 | — | — | — | 20000 | 44200 | 14000 | 9000 |
| 270 | — | — | — | 21000 | 44066 | 11044 | 8217 |
| 280 | — | — | — | 22468 | 40000 | 8759 | 8000 |
| 290 | — | — | — | 23000 | 35668 | — | 7360 |
| 300 | — | — | — | 25000 | 24036 | — | 8558 |

го цвета λ_i и спектральной плотности импульса по глубине подповерхностной среды трасс георадарного профилирования в общую дисперсию фактора исследовали методом главных компонент. Наибольшие значения вклада наблюдаются в гумусовых горизонтах и почвообразующих породах для почв с отрицательными значениями корреляционной матрицы. Для других почв сохраняется значительный вклад рассматриваемых признаков в общую дисперсию первого главного компонента доли гумусовых горизонтов и очень сильно проявляется зависимость от изменения мощности иллювиально-аккумулятивных горизонтов.

Установление мер сходства (близости межкластерного расстояния) отдельных кадров георадарного профилирования проводили по коэффициентам отражения (λ_i) спектра видимого света в диапазоне 500–720 нм, распределенным по глубине почвенных профилей исследуемой территории, указанным в табл. 3.

Если элементы неразличимы по изучаемому свойству (малые величины межкластерного расстояния характеризуют высокую степень сходства кадров), то объект считают однородным. Если меры сходства высокие, а характер мер связей

элементов различен, то объект по изучаемому свойству неоднороден. По этому критерию выделены две группы точек обследования:

- первая – точки ОП1 100 и ОП1 300;
- вторая – точки В1 200, В1 05, В1 126, ОП1 450, ОП1 950.

Данное объединение в дальнейшем стало основой для группировки данных цветовых параметров точек обследования почв при расчете прогностических моделей.

Любому цветовому пучку можно подобрать тождественный ему по цвету монохроматический пучок. Если насыщенности их одинаковы, то будут тождественны и их цветовые тона. Разностный порог $\Delta\lambda = \lambda_1 - \lambda$ называют порогом цвето-различения по цветовому тону. Экспериментально установлено, что участки спектра, где порог $\Delta\lambda$ имеет наименьшее значение, расположены вблизи 500 нм (голубые тона) и около 550–600 нм (от зеленых до оранжевых). Это области спектра, в которых глаз обладает наибольшей чувствительностью к измерению цветового тона ($\Delta\lambda = 1-2$ нм).

Рассчитаны регрессионные модели связи изменений показателей спектральной плотности

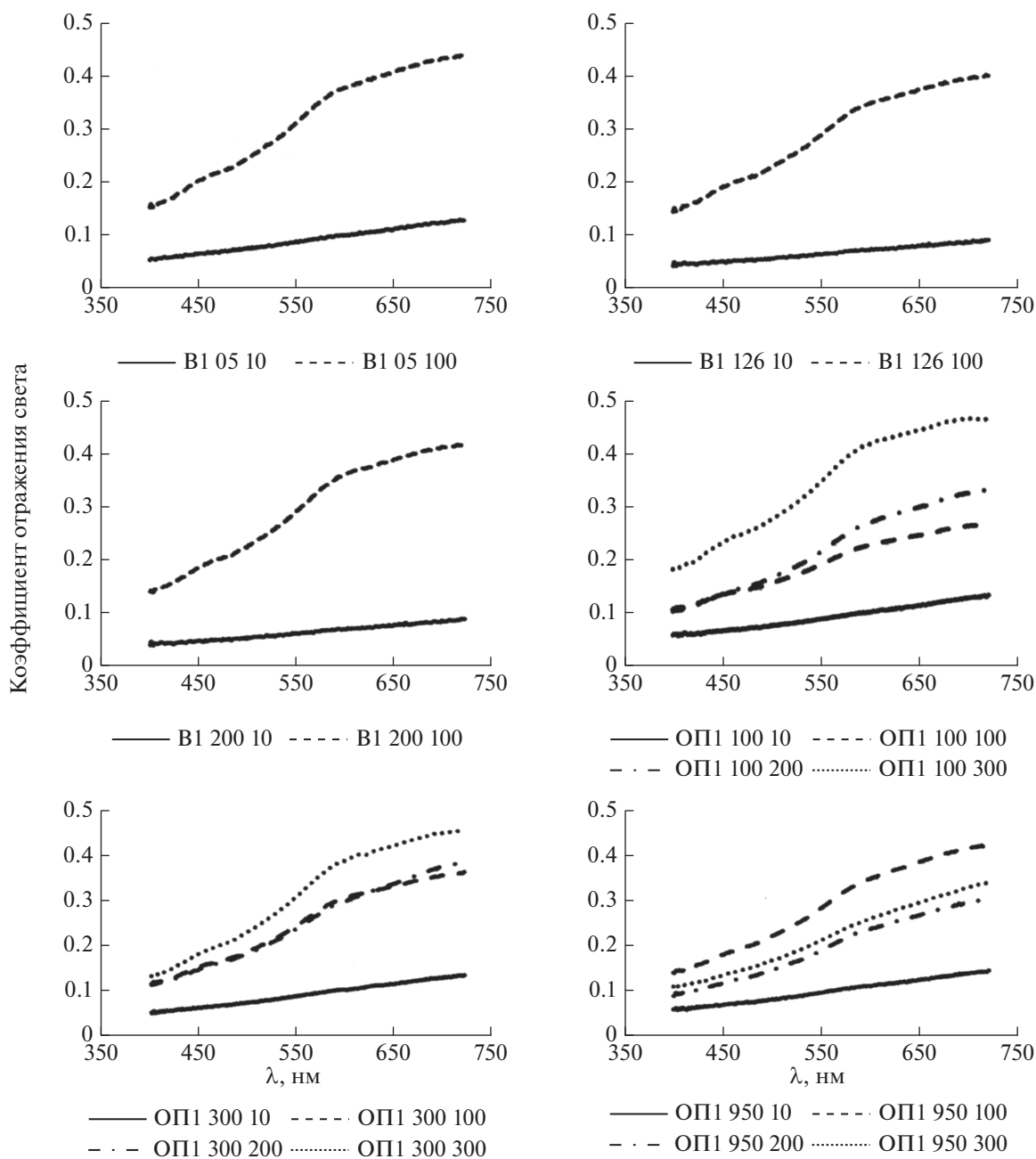


Рис. 3. Фактические данные спектральной отражательной способности образцов черноземов (Naplic Chernozem (Argic, Clayic)) Каменной степи (примеры).

амплитуды сигнала при преобразовании Фурье электромагнитных импульсов с показателями их цветовых свойств: условными коэффициентами чистого цвета (K_{λ_i}) в интервале 500–720 нм (модель 1) (рис. 4).

Четко выделяются нисходящие и восходящие типы трендов, которые отражают изменение полярности амплитуды отраженных импульсов в подповерхностной среде отдельных георадиолокационных трасс. Скорее всего, это связано с электродинамическими законами прохождения

зондирующих импульсов в неоднородной среде и усложнением системы за счет появления или удаления нового рассеивающего слоя (например, такое явление характерно для точки ОП 100 георадиолокационного профиля ОП1, рис. 4).

Учитывая относительно слабую связь коэффициентов спектральной отражательной способности почв со спектральной плотностью импульса ($r = 0.26–0.89$), создана модель 2 связи коэффициентов спектральной отражательной способности почв с коэффициентами чистого

Таблица 3. Средние значения цветовых параметров отражения видимого спектра света (факт/расчет)

| Параметр | Глубина, см | Номер точки | | | | | | |
|------------------|-------------|-------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | | В1 05 | В1 126 | В1 200 | ОП1 100 | ОП1 300 | ОП1 450 | ОП1 950 |
| ρ_r | 0–10 | 0.11/0.23 | 0.08/0.07 | 0.07/0.06 | 0.11/0.12 | 0.11/0.17 | 0.09/0.09 | 0.12/0.15 |
| | 40–50 | 0.12/0.31 | 0.24/0.21 | 0.16/0.09 | 0.12/0.15 | 0.12/0.21 | 0.17/0.25 | 0.22/0.19 |
| | 90–100 | 0.40/0.39 | 0.29/0.31 | 0.38/0.36 | 0.24/0.40 | 0.34/0.29 | 0.27/0.20 | 0.30/0.31 |
| | 140–150 | 0.43/0.43 | 0.35/0.32 | 0.34/0.35 | 0.29/0.22 | 0.38/0.32 | 0.34/0.35 | 0.25/0.29 |
| | 190–200 | – | – | – | 0.23/0.25 | 0.33/0.32 | 0.38/0.38 | 0.26/0.28 |
| | 240–250 | – | – | – | 0.28/0.31 | 0.59/0.58 | 0.34/0.35 | 0.26/0.26 |
| | 290–300 | – | – | – | 0.44/0.49 | 0.41/0.44 | – | 0.29/0.30 |
| ρ_g | 0–10 | 0.07/0.17 | 0.06/0.05 | 0.06/0.05 | 0.07/0.08 | 0.07/0.12 | 0.06/0.07 | 0.09/0.10 |
| | 40–50 | 0.13/0.23 | 0.16/0.15 | 0.12/0.07 | 0.08/0.11 | 0.08/0.14 | 0.12/0.18 | 0.16/0.14 |
| | 90–100 | 0.30/0.30 | 0.21/0.23 | 0.18/0.26 | 0.18/0.21 | 0.23/0.21 | 0.20/0.14 | 0.21/0.21 |
| | 140–150 | 0.31/0.31 | 0.23/0.24 | 0.25/0.25 | 0.20/0.16 | 0.25/0.21 | 0.24/0.25 | 0.17/0.20 |
| | 190–200 | – | – | – | 0.16/0.18 | 0.23/0.22 | 0.24/0.25 | 0.18/0.19 |
| | 240–250 | – | – | – | 0.20/0.22 | 0.43/0.42 | 0.23/0.24 | 0.17/0.18 |
| | 290–300 | – | – | – | 0.33/0.36 | 0.29/0.31 | – | 0.20/0.21 |
| ρ_b | 0–10 | 0.06/0.10 | 0.04/0.05 | 0.05/0.03 | 0.06/0.08 | 0.06/0.09 | 0.05/0.05 | 0.06/0.06 |
| | 40–50 | 0.06/0.15 | 0.11/0.11 | 0.07/0.06 | 0.06/0.13 | 0.06/0.10 | 0.09/0.11 | 0.12/0.09 |
| | 90–100 | 0.19/0.17 | 0.14/0.15 | 0.18/0.18 | 0.13/0.19 | 0.15/0.15 | 0.14/0.11 | 0.18/0.14 |
| | 140–150 | 0.20/0.19 | 0.15/0.15 | 0.17/0.18 | 0.13/0.12 | 0.13/0.15 | 0.16/0.16 | 0.11/0.13 |
| | 190–200 | – | – | – | 0.11/0.14 | 0.15/0.14 | 0.17/0.18 | 0.11/0.13 |
| | 240–250 | – | – | – | 0.14/0.16 | 0.26/0.21 | 0.15/0.16 | 0.11/0.13 |
| | 290–300 | – | – | – | 0.22/0.21 | 0.18/0.17 | – | 0.13/0.13 |
| λ_i , нм | 0–10 | 589/589 | 588/588 | 588/588 | 595/595 | 595/595 | 589/589 | 590/590 |
| | 40–50 | 589/589 | 588/589 | 588/588 | 594/593 | 595/595 | 590/590 | 590/590 |
| | 90–100 | 590/590 | 591/591 | 591/590 | 590/591 | 594/594 | 591/591 | 592/592 |
| | 140–150 | 592/592 | 590/590 | 590/590 | 593/593 | 593/594 | 592/592 | 593/593 |
| | 190–200 | – | – | – | 592/592 | 593/593 | 594/594 | 594/594 |
| | 240–250 | – | – | – | 591/591 | 591/591 | 592/592 | 594/593 |
| | 290–300 | – | – | – | 590/590 | 591/591 | – | 593/593 |

Таблица 4. Результаты анализа главных компонент

| Номер точки | n | Дисперсия факторов, % | | Значение фактора (F) | | | | | | | | |
|-------------|-----|-----------------------|------|--------------------------|-------|----------------------|------|---|-------|------------------------|------|-------|
| | | | | признак | | | | | | коэффициент корреляции | | |
| | | | | ρ_r (1) | | λ_i , нм (2) | | спектральная плотность импульса $c^2, \times 10^{-9}$ (3) | | | | |
| | | | | F_1 | F_2 | M | D | M | D | M | D | 1–2 |
| В1 05 | 16 | 85.7 | 12.3 | 0.27 | 0.14 | 589 | 1.14 | 4222 | 5880 | 0.82 | 0.63 | 0.89 |
| В1 126 | 16 | 75.4 | 19.2 | 0.26 | 0.11 | 589 | 1.09 | 5141 | 4844 | 0.68 | 0.42 | 0.76 |
| В1 200 | 16 | 89.1 | 10.1 | 0.27 | 0.12 | 589 | 1.21 | 5861 | 5027 | 0.86 | 0.70 | 0.94 |
| ОП1 100 | 35 | 85.9 | 10.9 | 0.31 | 0.13 | 591 | 1.60 | 10794 | 8538 | –0.70 | 0.89 | –0.76 |
| ОП1 300 | 30 | 85.5 | 10.8 | 0.34 | 0.14 | 593 | 1.52 | 11369 | 16283 | –0.83 | 0.67 | –0.84 |
| ОП1 450 | 28 | 85.3 | 12.5 | 0.30 | 0.10 | 591 | 1.43 | 18950 | 21986 | 0.86 | 0.62 | 0.84 |
| ОП1 950 | 30 | 71.3 | 24.9 | 0.27 | 0.06 | 593 | 1.52 | 9423 | 7189 | 0.61 | 0.26 | 0.81 |

Примечание. M – среднее значение, D – дисперсия среднего.

цвета (K_{λ_i}), для которой коэффициент корреляции более 0.8 (рис. 5).

Рассчитать цветовые параметры без построенных моделей невозможно, так как при георадарном профилировании никакие цветовые параметры реально не определяются. А необходимо

иметь, как минимум, три показателя: средние значения коэффициентов отражения в красных, зеленых и синих диапазонах видимого спектра.

Полученные по этим моделям расчетные параметры цветности почв явились основой для построения модели RGB слоев почв и ее визуализации в графических редакторах (рис. 6).

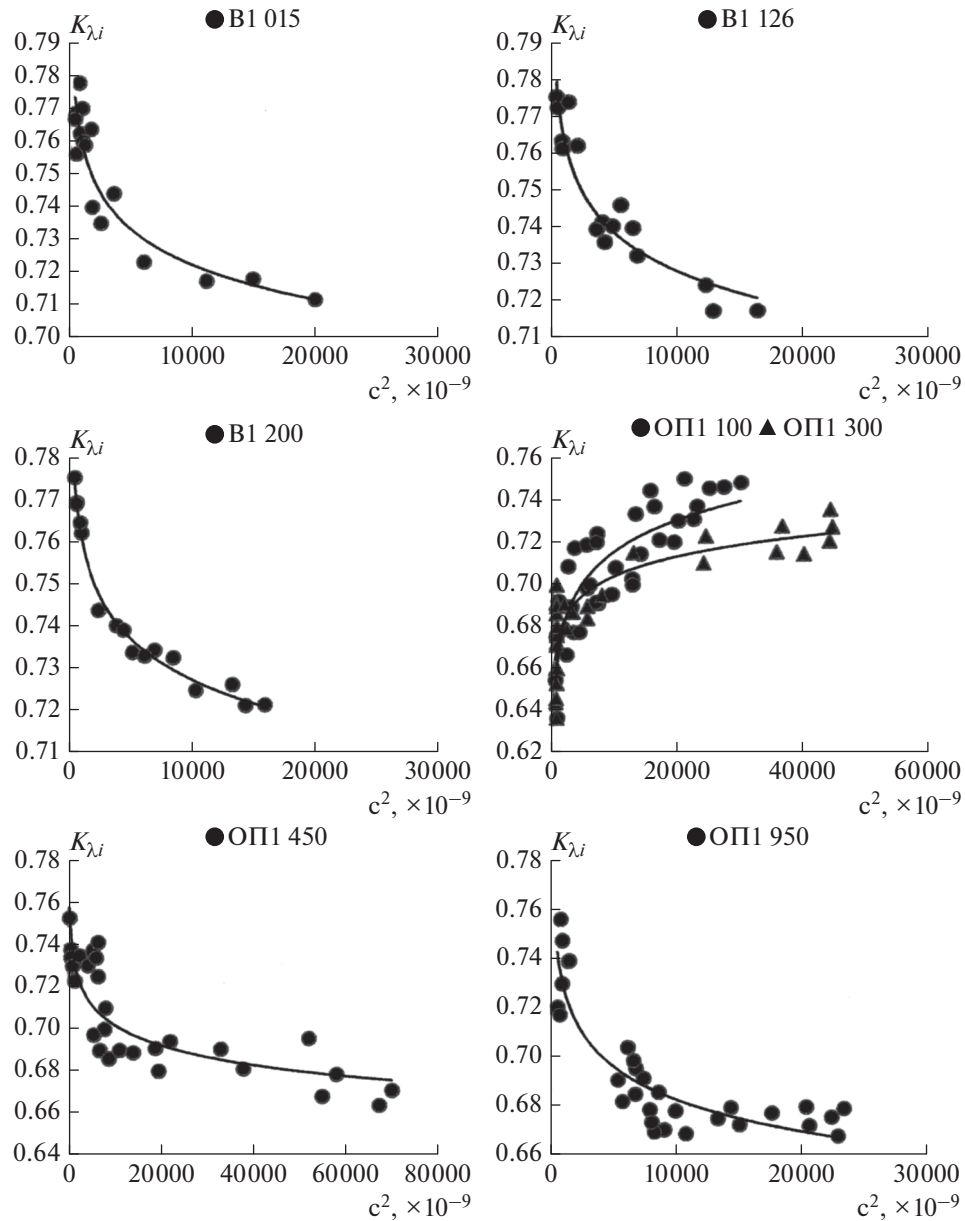


Рис. 4. Зависимости изменения условных коэффициентов чистого спектра видимого света в диапазоне 500–720 нм у (K_{λ_i}) и спектральной плотности электромагнитного импульса x ($c^2, \times 10^{-9}$) в профилях черноземов (Haplic Chernozem (Aric, Clayic)) Каменной степи Воронежской области (модель 1). B1 05: $y = 0.88x^{-0.022}$; B1 126: $y = 0.87x^{-0.020}$; B1 200: $y = 0.87x^{-0.019}$. OP1 100: $y = 0.55x^{0.029}$; OP1 300: $y = 0.59x^{0.018}$; OP1 450: $y = 0.85x^{-0.020}$; OP1 950: $y = 0.89x^{-0.028}$.

Расчет координат RGB в этой модели проводится по выражениям:

$$R = (\rho_r) \times 255/0.85,$$

$$G = (\rho_g K_{li}) \times 255/0.85,$$

где ρ_r, ρ_g – коэффициенты отражения.

Расчет координаты В проводили по остаточному принципу после расчета координат R и G.

Визуализация трендовых расчетных показателей координат RGB спектра видимого света в

диапазоне 400–720 нм по профилям черноземов Каменной степи Воронежской области показала высокую сходимость их с фактическими данными в пределах выделенных слоев в подповерхностной среде.

Проверку статистической значимости параметров моделей осуществляли с помощью функций ошибок прогнозирования [15]. Для всех выборок рассчитывали квадрат отклонений (разницу между фактом и прогнозом, возведенную в квадрат), среднее арифметическое (сумму квад-

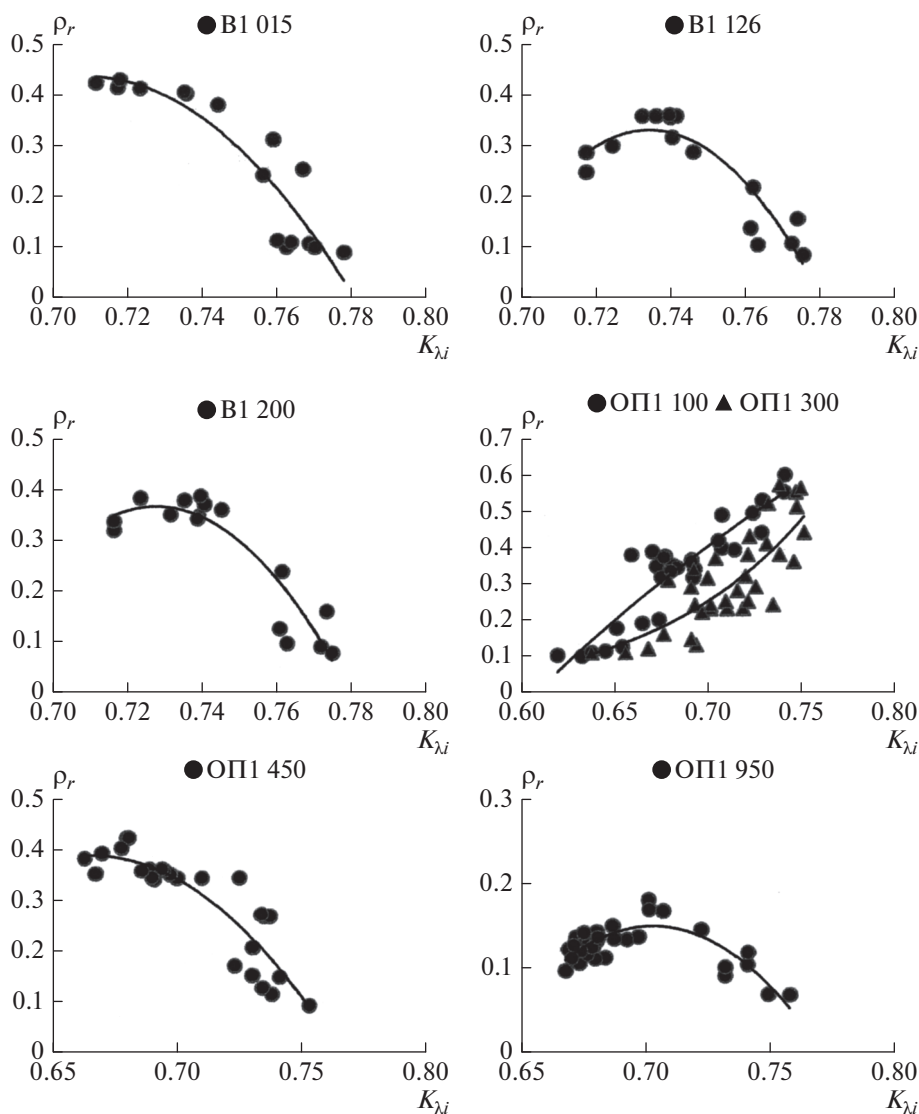


Рис. 5. Зависимости изменения коэффициентов спектрального отражения почв в интервале 580–720 нм (ρ_r) и условных коэффициентов чистого спектра видимого света в диапазоне 500–720 нм (K_λ) в профилях черноземов (Haplic Chernozem (Agic, Clayic)) Каменной степи Воронежской области (модель 2). B1 05: $y = -84.2x^2 + 119.3 - 41.8$; B1 126: $y = -153.1x^2 + 224.6 - 82.1$; B1 200: $y = -137.9x^2 + 200.8 - 72.7$; ОП1 100: $y = 22.2x^2 - 27.5 + 8.6$; ОП1 300: $y = -6.1x^2 + 12.4 - 41.8$; ОП1 450: $y = -39.4x^2 + 52.4 - 17.1$; ОП1 950: $y = -62.7x^2 + 87.4 - 30.2$.

ратов отклонений, деленную на число массивов), извлекали корень из полученного результата. Полученный результат переводили в нормализованную среднеквадратичную ошибку RPIQ [20]. Критерием значимости моделей считается значение RPIQ больше 2.0 (табл. 5).

Все приведенные модели отвечают этим требованиям. Результаты визуализации цвета слоев почв (рис. 6, табл. 5) показывают, что в целом предсказание цвета слоев по данным георадарного профилирования оказалось успешным. Однако соответствие предсказанного цвета реальному оказалось не полным. Особенно это заметно для

почв точек ОП1 100 и 300, где степенные функции имеют положительные значения.

Видимо, это может быть связано с тем, что сложение (плотность, структура, пористость) профиля этих почв более неоднородно по сравнению с нижней частью профилями других точек обследования. Причинами этих явлений служит образование вторичной карбонатности нижних частей профиля при повышенной их увлажненности. Появление таких очагов плохо прогнозируемо дистанционными методами и требуют дополнительных разработок.

Несмотря на это, проведенный эксперимент показал, что потенциальные возможности предска-

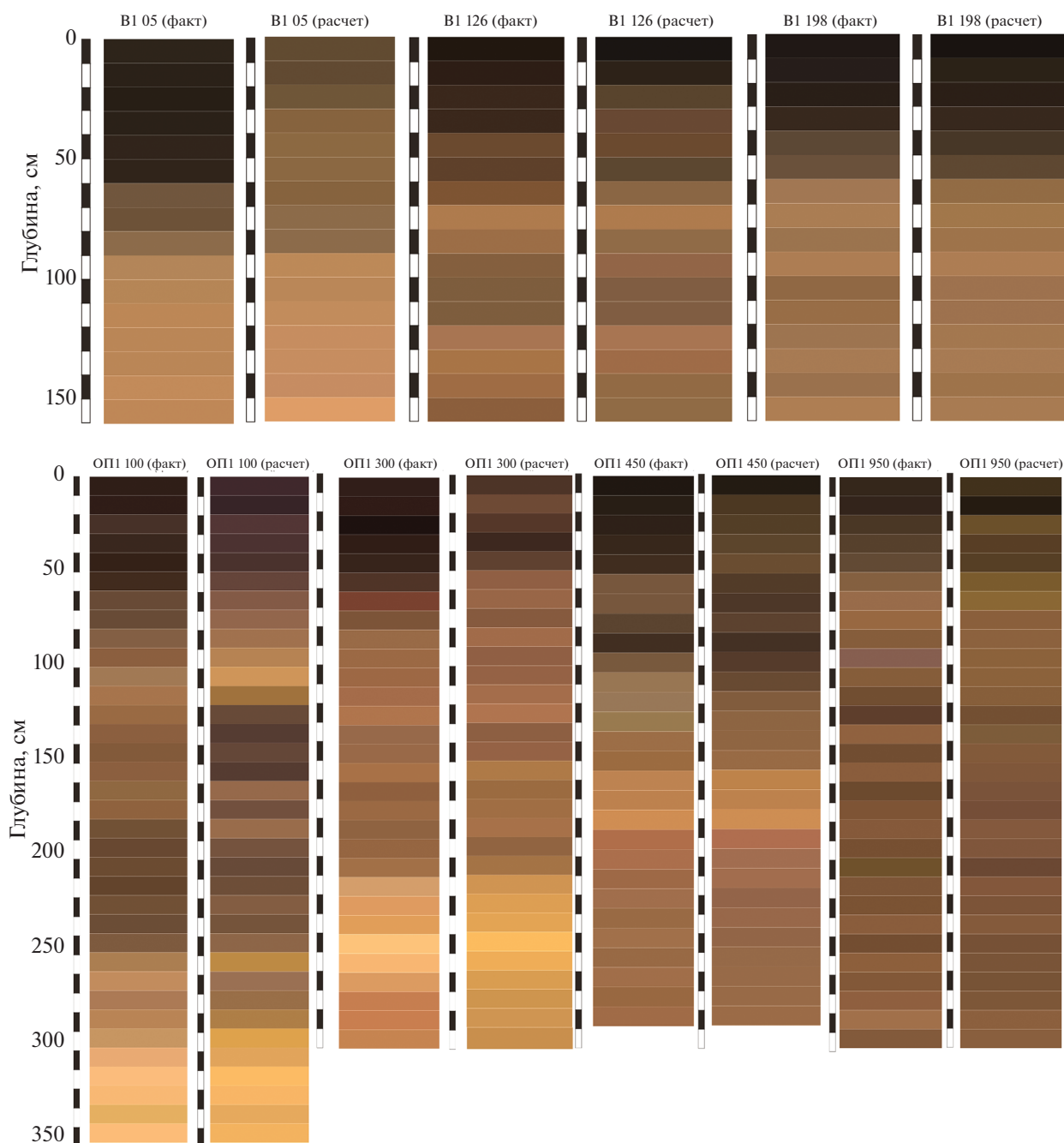


Рис. 6. Фактические и расчетные значения цвета высушенных образцов почв в системе RGB по точкам георадарного профилирования Каменной степи.

ния цвета слоев почв по данным георадарного профилирования возможно. Основным ограничением данного метода, видимо, является антропогенная трансформация естественных профилей (наличие артефактов и др.). В настоящее время построенные модели применимы лишь к почвам, аналогичным по свойствам изученным.

Для территорий с другим почвенным покровом модели должны быть построены заново. Несмотря на этот недостаток, данный подход может быть ис-

пользован для организации бесконтактного мониторинга подповерхностных свойств почв.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный эксперимент показал, что данные георадарного профилирования имеют достаточно хорошую корреляцию с цветом подповерхностных горизонтов почв на территории исследований. Коэффициент корреляции между предсказанными

Таблица 5. Оценка прогнозирования моделей

| Номер точки | n | R^2 | RMSE* | Квартиль 1 | Квартиль 3 | RPIQ** |
|------------------------------|-----|-------|-------|------------|------------|--------|
| Модель 1 ($K_{\lambda,i}$) | | | | | | |
| V1 05 | 16 | 0.86 | 0.013 | 0.73 | 0.76 | 2.31 |
| V1 126 | 16 | 0.89 | 0.006 | 0.73 | 0.76 | 4.17 |
| V1 200 | 16 | 0.99 | 0.007 | 0.73 | 0.76 | 3.71 |
| ОП1 100 | 35 | 0.72 | 0.015 | 0.69 | 0.73 | 2.66 |
| ОП1 300 | 30 | 0.83 | 0.011 | 0.67 | 0.71 | 3.67 |
| ОП1 450 | 28 | 0.73 | 0.013 | 0.69 | 0.71 | 1.63 |
| ОП1 950 | 30 | 0.80 | 0.011 | 0.67 | 0.70 | 2.37 |
| Модель 2 (ρ_r) | | | | | | |
| V1 05 | 16 | 0.83 | 0.11 | 0.11 | 0.41 | 2.62 |
| V1 126 | 16 | 0.83 | 0.06 | 0.19 | 0.35 | 2.57 |
| V1 200 | 16 | 0.85 | 0.044 | 0.15 | 0.36 | 4.78 |
| ОП1 100 | 35 | 0.66 | 0.078 | 0.23 | 0.38 | 1.91 |
| ОП1 300 | 30 | 0.83 | 0.071 | 0.23 | 0.40 | 2.34 |
| ОП1 450 | 28 | 0.79 | 0.045 | 0.25 | 0.36 | 2.36 |
| ОП1 950 | 30 | 0.74 | 0.001 | 0.25 | 0.30 | 1.95 |

* Среднеквадратическая ошибка. ** Показатель оценки качества прогноза модели [20].

значениями цветности сухих образцов почв и определенными экспериментально превышает 0.8.

Построенные модели связи данных георадарно-профилирования с цветом образцов почв для территории исследований не могут быть перенесены на территории с другими почвами. Но построение на основе предложенного подхода подобных моделей для других почв может служить основой для организации мониторинга свойств подповерхностных слоев почв без вскрытия их профиля. Подобные индивидуальные модели могут рассматриваться как основа для мониторинга свойств почвы, которые определяют сигнал радиолокационного зондирования.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследования выполнены при поддержке гранта РФФИ № 18-016-00052 и гранта Минобрнауки РФ по соглашению № 075-15-2019-1939 в рамках ФЦП “Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы”.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Водяницкий Ю.Н., Шишов Л.Л.* Изучение некоторых процессов по цвету почв. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 2004. 84 с.
2. *Воронин А.Я.* Критерии идентификации строения и функциональных свойств почвенного профиля в георадиолокационных исследованиях с использованием георадара “Лоза-В” // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2015. № 80. С. 106–128. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2015-80-106-128>
3. *Воронин А.Я., Савин И.Ю.* Георадарная диагностика мощности гумусового горизонта черноземов // Российская сельскохозяйственная наука. 2018. № 2. С. 34–40.
4. *Грищенко М.Н.* Гидрологическая роль лесных полос. М.: Гослесбумиздат, 1963. 201 с.
5. *Захаров С.А.* Курс почвоведения. М., 1927. 455 с.
6. *Караванова Е.И., Орлов Д.С., Амосова Я.М.* Спектральные свойства почв как результат влияния природных и антропогенных факторов. М.: ВИНТИ, 1997. 59 с.
7. *Карманов И.И.* Спектральная отражательная способность и цвет почв как показатели их свойств. М.: Колос, 1974. 351 с.
8. *Классификация и диагностика почв СССР.* М.: Колос, 1977. 223 с.
9. *Ларионова Е.В.* Физические основы цвета. СПб.: Национальный минерально-сырьевой университет “Горный”, 2013. 212 с.
10. *Методические рекомендации по применению георадаров при обследовании дорожных конструкций.* М.: Министерство транспорта Российской Федерации, 2003.
11. *Мигалина И.В.* Расчет цветности излучения: учебно-методические указания к курсовой расчетно-графической работе. М.: МАРХИ, 2011. 36 с.
12. *Орлов Д.С.* Спектральная отражательная способность почв и их компонентов. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2001. 175 с.
13. *Орлов Д.С., Садовников Ю.Н., Обухов А.И.* Определение окраски почв визуальным способом и спектрофотометрическим способом // Вестник Моск. ун-та. Сер. 17, почвоведение. 1980. № 3. С. 410–418.
14. *Подповерхностное зондирование с помощью геофизического комплекса “ЛОЗА”, “ЛОЗА-М” (поиск протяженных подземных сооружений).* М.: ВНИИЛМИ, 2012. 16 с.
15. *Резников А.Е., Копейкин В.В., Морозов П.А., Шеколов А.Ю.* Разработка аппаратуры, методов обработки данных для электромагнитного подповерхностного зондирования и опыт их применения //

- Успехи физических наук. 2000. № 5. <http://www.geo-radar.ru/publish/pub2.php>
16. Савин И.Ю. О тоне изображения открытой поверхности почв как прямом дешифровочном признаке // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2013. Вып. 71. С. 52–64.
 17. Савин И.Ю., Столбовой В.С., Иванов А.Л., Прудникова Е.Ю., Жоголев А.В., Воронин А.Я. Технологии составления и обновления почвенных карт. М.: Перо, 2019. 328 с.
 18. Старовойтов А.В. Интерпретация георадиолокационных данных. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2008. С. 190.
 19. Хитров Н.Б. Структура почвенного покрова Каменной степи // Разнообразии почв Каменной степи. М.: Почв. ин-тим. В.В. Докучаева, 2009. С. 41–71.
 20. Bellon-Maurel V., Fernandez-Ahumada E., Palagos B., Roger J.M., Mc Bratney A. Critical review of chemometric indicators commonly used for assessing the quality of the prediction of soil attributes by NIR spectroscopy // Tr AC Trends in Analytical Chemistry. 2010. V. 29(9). P. 1073–1081.
 21. Bernatek-Jakiel A., Kondracka M. Detection of soil pipes using ground penetrating radar // Remote Sens. 2019. V. 11. P. 1864. <https://doi.org/10.3390/rs11161864>
 22. Brown D.J., Shepherd K.D., Walsh M.G., Mays M.D., Reinsch T.G. Global soil characterization with VNIR diffuse reflectance spectroscopy // Geoderma. 2006. № 132. P. 273–290.
 23. Daughtry C.S.T., Bausch W.C. Remote- and ground-based sensor techniques to map soil properties // Photogramm. Eng. Remote Sens. 2003. V. 69. № 6. P. 619–630.
 24. 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. № 66. P. 1922–1928.
 25. IUSS Working Group WRB. 2015. World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports No. 106. FAO, Rome. 203 p.
 26. Khan ZaibJadoon, Lutz Weihermüller, Matthew F. McCabe, Davood Moghadas, Harry Vereecken, Sebastian Lambot. Temporal monitoring of the soil freeze–thaw cycles over a snow-covered surface by using air-launched ground-penetrating radar // Remote Sens. 2015. V. 7. № 9. P. 12041–12056.
 27. Landa E.R., Fairchild M.D. Charting Color from the Eye of the Beholder // Am. Scientist. 2005. V. 93. № 5. P. 436–443.
 28. Lesaignoux A., Fabre S., Briotter X., Oliosio A. Influence of surface soil moisture on spectral reflectance of bare soil in the 0.4–15 μm domain // Geosci. Remote Sensing Lett. 2011. V. 8. № 1. P. 143–147.
 29. Metternicht G., Zinck J.A. Remote sensing of soil salinization. Impact on land management. N.Y.: CRC Press, 2009. 377 p.
 30. Savin I.Yu., Prudnikova E.Yu., Vasilyeva N.A., Veretelnikova I.V., Bairamov A.N. The color of soils as a basis for proximal sensing of their composition // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2016. № 86. С. 46–52.
 31. Truman C., Perkins H.F., Asmussen Loris E., Allison H.D. Using ground penetrating radar to investigate variability in selected soil properties // Soil and Water Conserve. 1988. V. 43(4). P. 341–345.

Correlation between Color of Subsurface Soil Horizons and Ground-Penetrating Radar Data

A. Ya. Voronin¹ and I. Yu. Savin^{1, 2, *}

¹Dokuchaev Soil Science Institute, Moscow, 119017 Russia

²Agrarian-Technological Institute, RUDN University, Moscow, 117198 Russia

*e-mail: savin_iyu@esoil.ru

The aim of the research was to analyze the relationship of color indicators of soil layers with the parameters obtained by ground-penetrating radar (GPR) profiling. Such parameters were the data of the spectral Fourier transform of the amplitude of the reflected pulse in the subsurface medium of the soils of the Kamennaya Steppe area. GPR profiling was carried out by the geophysical device Loza-V. The diffraction points of reflected pulse amplitude corresponding to local soil horizons and groundwater surface were determined. The variability in the thickness of horizons and layers was calculated through the modules of amplitude maxima taking into account the conductivity of the horizon (dielectric permittivity and the rate of signal passage in a given medium). The procedure of verification of differentiation of sounding points was based on their comparison with real soil profiles and patterns. Statistical processing included the calculation of mean values, standard deviations, and frequencies of signal amplitude distribution; the use of the principal component method; and cluster analysis. Two polynomial models of connection of changes in parameters of the spectral Fourier transform of electromagnetic pulses in subsurface medium of chernozems with attributive parameters of formation of spectral pure colors of dominant wavelength (λ_i) were constructed. The indicative parameters included the conditional coefficient of pure color (K_{λ_i}), which corresponds to the addition functions in the tri-color colorimetric system MKO XYZ 1931, and its saturation, which is completely determined by the properties of the reflection coefficient (R) in the spectral range of λ 580–720 nm (red band). The calculated parameters of soil chromaticity obtained on the basis of these models were the prerogative for constructing the RGB model of soil layers and its visualization in graphic editors.

Keywords: radarogram, spectral density, spectral reflectivity, RGB color model