

ФОРМИРОВАНИЕ СВЕТОЦВЕТОВОГО ИНФОРМАЦИОННОГО ОБРАЗА ПОЧВЫ В ТЕХНОЛОГИИ ТОЧНОГО ЗЕМЛЕДЕЛИЯ

Колешко В. М.*, Гулай А. В.*, Лученок С. А.**

Исследован метод формирования светоцветового информационного образа почвы на основе измерения конечного числа цветочных точек оптической характеристики почвенного горизонта. Изучено влияние основных физических параметров почвы на формирование контролируемых светоцветовых образов почвенных образцов. Проведен анализ изменения светоцветовых информационных образов почвы в зависимости от ее состава, структуры и влажности.

Реализация технологических процессов точного земледелия возможна на основе использования достоверной информации о плодородии почвы по всей обрабатываемой площади. Для получения данной информации разработан метод светоцветового контроля качества почвы, сущность которого заключается в формировании информационного образа в виде оптимального набора оптических параметров обрабатываемой почвы [1, 2]. Разработанный метод контроля реализуется путем внедрения электронно-оптического сенсорного блока в почву на определенную глубину и перемещения его в толще гумусово-аккумулятивного слоя с одновременным периодическим формированием светоцветовых информационных образов почвы.

Учитывая вышеизложенное представляет интерес исследование процесса формирования светоцветовых информационных образов на основе измерения конечного числа цветочных точек оптической характеристики почвы. Более того, поскольку при перемещении оптической сенсорной системы в процессе контроля происходят случайные изменения измеряемых оптических параметров, необходимо изучение вопроса оптимизации набора получаемых информационных точек светоцветового образа почвы. Кроме этого, представляется важным проведение исследований влияния основных физических характеристик почвы (состава, структуры, влажности) на формирование контролируемого светоцветового образа почвенного горизонта.

Концептуальные основы метода формирования светоцветового информационного образа почвы

При решении задачи оптимизации объема контролируемых параметров речь идет о количестве отдельных точек оптического спектра, необходимом для получения достаточной информации о светоцветовом образе контролируемой почвы, и о рациональном расположении измеряемых дискретных значений в определенном диапазоне длин волн оптического излучения. Здесь следует отметить, что чисто статистический подход к исследованию случайных спектров оптического излучения требует достаточно частого расположения измеряемых значений на спектральной оси и, следовательно, обработки значительных массивов экспериментальных данных. Такой подход неприемлем при организации оперативного контроля параметров почвы, когда требуется получение результатов диагностики ее свойств в режиме реального времени при относительно высокой скорости перемещения сенсорной системы.

В основу разработанного метода положен тот факт, что при измерении оптических параметров почвы имеется априорная информация о ее физико-химических свойствах, оказывающих существенное влияние на контролируемые характеристики. Эту информацию целесообразно использовать для того, чтобы сократить число измеряемых цветочных точек и, следовательно, уменьшить объем усилий на формирование светоцветового образа и статистическую обработку результатов контроля. В связи с вышеизложенным целесообразна разработка основных правил формирования информационных образов, претерпевающих случайные изменения во времени в соответствии с изменением цвета почвы в процессе контроля. При

этом возможно также определение некоторых общих принципов оптимизации для расположения контролируемых цветовых точек в выбранном оптическом диапазоне.

Рассмотрим цвето-временное скалярное поле, заданное в некоторой области A , которое для определенности можно считать полем показателя отражения $\rho(\lambda, t)$, где λ — длина волны оптического излучения; t — время. В области A выбираем n точек $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$, измеряя в которых реализации поля $\rho(\lambda, t)$ и производя статистическую обработку результатов, находим оценки математических ожиданий и взаимных моментов $\langle \rho(\lambda_j, t) \rangle$, $\langle \rho(\lambda_j, t) \rho(\lambda_k, t') \rangle$, $\langle \rho(\lambda_j, t) \rho(\lambda_k, t') \dots \rho(\lambda_l, t'') \rangle$, ($j, k, l, \dots = 1, 2, \dots, n$); угловые скобки означают усреднение по множеству реализаций поля. Условие оптимизации состоит в том, чтобы указать число цветовых точек n и их расположение в области A , необходимые для оценки математического ожидания и взаимных моментов поля $\rho(\lambda, t)$ во всех точках $\lambda \in A$.

Задача описания поля параметров $\rho(\lambda, t)$ с помощью их конечного числа n в приближенной постановке может считаться вполне корректной. Для решения этой задачи используем разложение поля в ряд по некоторой системе детерминистических базисных функций $\varphi_\alpha(\lambda)$. Эту систему выберем таким образом, чтобы почти любая реализация поля $\rho(\lambda, t)$ могла быть аппроксимирована при помощи ряда

$$\rho(\lambda, t) = \sum_{\alpha} Q_{\alpha}(t) \varphi_{\alpha}(\lambda), \quad (1)$$

где $Q_{\alpha}(t)$ — случайные функции от времени. Если $\varphi_{\alpha}(\lambda)$ — базисные функции для разложения функции измеряемого спектрального показателя отражения поверхности, то $Q_{\alpha}(t)$ имеют смысл интегрального показателя отражения во всем исследуемом оптическом диапазоне. При этом для математического ожидания поля $\rho(\lambda, t)$ получаем выражение

$$\langle \rho(\lambda, t) \rangle = \sum_{\alpha} \langle Q_{\alpha}(t) \rangle \varphi_{\alpha}(\lambda). \quad (2)$$

Полагая в соотношении (2) $\lambda = \lambda_j$ ($j = 1, 2, \dots, n$) и учитывая n членов ряда, получим относительно математических ожиданий $\langle Q_{\alpha}(t) \rangle$ систему уравнений

$$\sum_{\alpha=1}^n a_{j\alpha} \langle Q_{\alpha}(t) \rangle = \langle \rho(\lambda_j, t) \rangle, \quad (3)$$

($j = 1, 2, \dots, n$). Коэффициенты этой системы

$$a_{j\alpha} = \varphi_{\alpha}(\lambda_j) \quad (4)$$

образуют квадратную матрицу размерностью $n \times n$. Если определитель матрицы отличен от нуля, то из уравнения (3) можно найти математические ожидания интегрального показателя отражения. Подстановка найденных значений $\langle Q_{\alpha}(t) \rangle$ в формулу (2) позволяет вычислить математическое ожидание поля $\rho(\lambda, t)$ во всех точках $\lambda \in A$. Таким образом, число измеряемых цветовых точек информационного образа равно числу членов ряда (1), которое необходимо для удовлетворительной аппроксимации поля $\rho(\lambda, t)$.

Из общего правила следует, что чем больше масштаб неоднородности поля по оптическому диапазону, тем меньшее число цветоцветовых точек данного диапазона необходимо контролировать. Предположим, что контроль параметра отражения производится в оптическом диапазоне шириной $\Delta\lambda = \lambda_n - \lambda_0$, а функции $\varphi_{\alpha}(\lambda)$ ортогональны на отрезке $[\lambda_n, \lambda_0]$; λ_n , λ_0 — соответственно нижнее и верхнее значения длины волны контролируемого оптического диапазона. В этом случае наименьший масштаб неоднородности, который может быть учтен при помощи ряда, содержащего первые n функций, будет иметь порядок $\Delta\lambda/n$. Число цветоцветовых точек, в которых измеряется параметр отражения, должно удовлетворять неравенству:

$$n \geq c \Delta\lambda q, \quad (5)$$

где $c > 1$ — постоянная; q — масштаб неоднородности поля измеряемых параметров.

В процессе практической реализации светоцветового метода контроля при выборе количества информационных цветowych точек априорной информацией являются сведения об интенсивности отражения почвой оптического излучения видимого диапазона длин волн. Так, коэффициент отражения почвенного слоя, а также его зависимость от физических параметров почвы резко снижается с уменьшением длины волны в области фиолетового света. В области инфракрасного (ИК) излучения контролируемый диапазон ограничивается значениями нескольких микрометров, так как при больших длинах волн начинает сказываться влияние спектра колебаний молекул воды в почве, что вносит дополнительные погрешности в результаты диагностики почвенного горизонта. Эти обстоятельства определили ограничения диапазона длины волны, в котором выбираются светоцветовые точки контроля почвы.

Таким образом, контролируемый спектр отраженного излучения лежит в области от фиолетового света до ближнего инфракрасного диапазона, то есть в области длин волн от $\lambda_{н} = 400$ нм до $\lambda_{к} = 1-2$ мкм с шагом ~ 70 нм (фиолетовый–синий свет); ~ 50 нм (синий–зеленый свет); ~ 70 нм (зеленый–желтый свет); ~ 20 нм (желтый–оранжевый свет); ~ 20 нм (оранжевый–красный свет); > 20 нм (красный свет–ИК-излучение). Отсутствие больших неоднородностей в спектре оптических сигналов, отраженных от почвенного слоя, позволяет достаточно эффективно использовать данный вариант дискретизации контролируемого спектрального диапазона при реализации разработанного способа диагностики почвы.

Разработанный метод контроля почвы реализуется с использованием мобильной мультисенсорной системы, выполненной в виде навесного или прицепного агрегата для сельскохозяйственных машин и содержащего электронно-оптический блок, соединенный с устройством обработки информации (рис. 1) [3–6]. Сенсорные сигналы обрабатываются микропроцессорным устройством, формирующим информационные образы, которые характеризуют содержание в почве органических веществ и ее влажность. Продолжительность процедуры формирования светоцветового образа почвы составляет 120 мс (8 информационных импульсов длительностью по 10 мс с временными промежутками между импульсами по 5 мс). Периодичность формирования информационных образов равна 1 с, что при минимальной скорости транспортирующего средства ~ 2 км/час позволяет получить пространственное разрешение контроля почвы от 0,5 м.

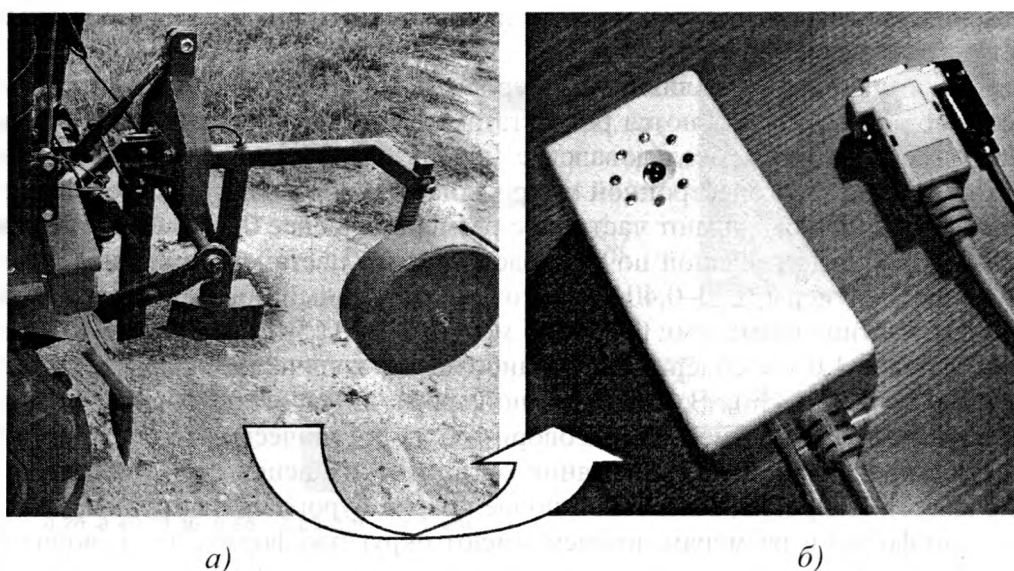


Рис. 1. Мультисенсорная система для светоцветового контроля почвы: а — в составе навесного устройства к мини-трактору; б — электронно-оптический блок мультисенсорной системы.

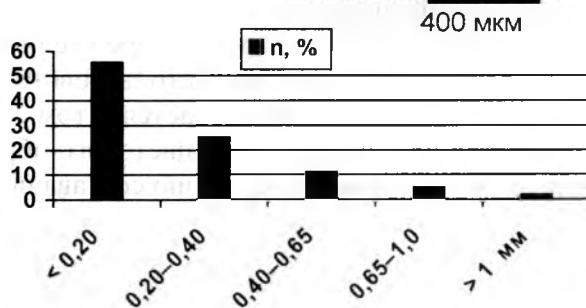
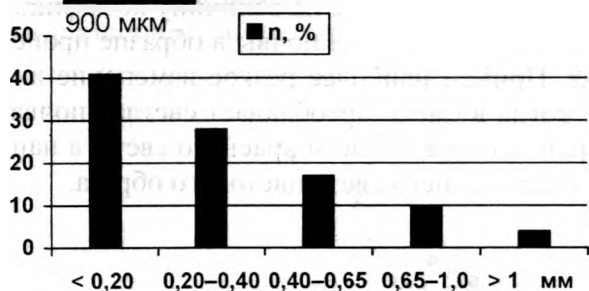
Физико-механические свойства почвы и ее цветоцветовые информационные образы

Цветоцветовые образы почв исследовались с использованием специально подобранных почвенных образцов, имеющих наиболее контрастные цветовые оттенки в соответствии с треугольником почвенных окрасок. Треугольник почвенных окрасок строится исходя из того, что гумус почвы окрашивает ее в серые и темно-серые тона, соединения железа — в бурые, красноватые и желтоватые тона, а многие компоненты почвы (двуокись кремния, кварц, карбонаты и сульфаты кальция) имеют белый цвет. Цветоцветовые образы получали в виде набора значений коэффициента яркости $R = I/I_0$, где I, I_0 — интенсивность света, отраженного соответственно от контролируемого почвенного образца и от эталонной белой поверхности. Проведенные исследования позволили для каждого изучаемого почвенного образца определить свой цветоцветовой образ в виде присущего только данному образцу набора значений показателя отражения оптического излучения (рис. 2).

Лабораторный анализ показал, что содержание органических веществ в отобранных образцах почвы лежит в диапазоне 1,2–12,4%. Влажность почвы не превышает 2,1% и не оказывает существенного влияния на точность измерений. Для почвы темно-серого и светло-серого оттенков, а также песчаной почвы бурого цвета характерно содержание органических веществ соответственно 12,4; 4,8; 1,2%, а значения коэффициента яркости для оптического излучения с разной длиной волны находятся в пределах: 0,154–0,306; 0,189–0,444; 0,172–0,427. Внутри приведенных диапазонов значения измеряемых показателей отражения имеют характерное распределение для каждого почвенного образца. Таким образом, для каждой точки контроля почвы в полевых условиях формируется свой, присущий только данной точке цветоцветовой образ, расшифровывая который судят о качестве почвы.

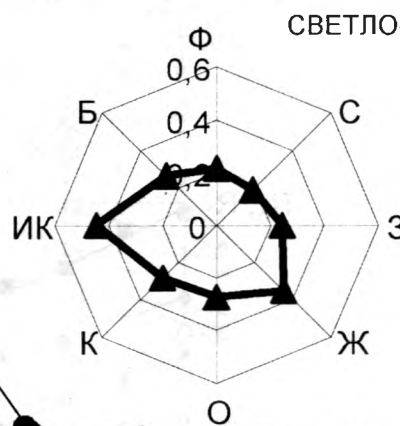
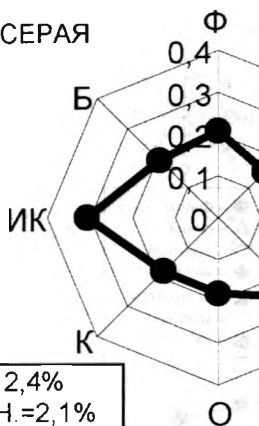
Наряду с содержанием в почве органических веществ, важным фактором, влияющим на отражение оптического излучения от почвенного образца, является структура почвы. Под структурой почвы понимается, как правило, распределение частиц минерального вещества, размеры которых меньше 2 мм. Предполагается, что отражение оптического излучения слоем частиц обусловлено только рассеянием света. Размеры частиц влияют на величину показателя рассеяния s , которая прямо пропорциональна общей площади Q_1 поперечного сечения частиц в единице объема. Представляя частицы почвы в виде сфер диаметром d , получим $Q_1 = (\pi d^2/4)Z_1$, где Z_1 — число частиц в единице объема. При плотной упаковке частиц Z_1 обратно пропорционально объему частицы V : $Z_1 \sim 1/V = 6/(\pi d^3)$, откуда $s \sim Q_1 \sim c/d$, где c — коэффициент. Следовательно, чем больше мелких частиц, тем больше s и тем выше коэффициент отражения. В частности, отражение увеличивается экспоненциально с уменьшением размера частиц от 2,5 мм до 25 мкм.

Учитывая значительное влияние размеров частиц почвы на ее отражательные свойства, цветоцветовые образы дополняются результатами исследования структуры почвы. Гранулометрический состав почвы исследовался с использованием метода сухого просеивания, а также методом растровой электронной микроскопии. В образцах темно-серой, светло-желтой и светло-серой почв преобладают частицы с размерами менее 0,20 мм (соответственно: 41,0; 51,0; 55,5%). В образце песчаной почвы красно-бурого цвета максимальное количество частиц (37%) имеет размеры 0,20–0,40 мм. Этот же почвенный образец содержит больше, чем другие почвы, частицы размерами 0,40–0,65 мм (28%) и 0,65–1,0 мм (14%). Крупные частицы с размерами более 1,0 мм содержатся в наибольшем количестве в образцах темно-серой и красно-бурой почв (по 4%). В почве темно-серого цвета наблюдаются крупные частицы сложной формы, что, вероятнее всего, говорит об их органическом происхождении. Это подтверждается тем фактом, что содержание органических веществ в этой почве составляет 12,4% (по массе). Напротив, в песчаной почве красно-бурого цвета крупные частицы близки друг другу по форме и размерам, причем имеют округлую форму, что говорит об их минеральном происхождении. Подтверждением этому служит тот факт, что данные образцы почвы содержат наименьшее количество органических веществ — 1,2% (по массе).



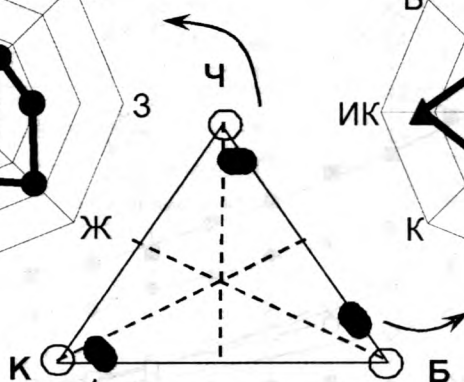
ТЕМНО-СЕРАЯ ПОЧВА

СВЕТЛО-СЕРАЯ ПОЧВА

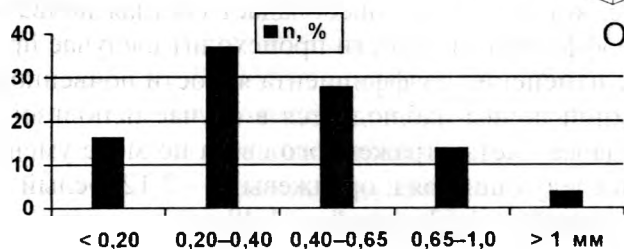


СОВ=12,4%
ВЛАЖН.=2,1%

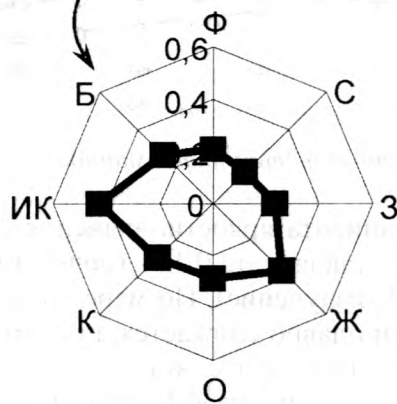
СОВ=4,8%
ВЛАЖН.=1,1%



КРАСНО-БУРАЯ ПОЧВА



СОВ=1,2%
ВЛАЖН.=0,3%



400 МКМ

Рис. 2. Информационные образы контролируемой почвы: СОВ — содержание органических веществ; (цвет почвы на треугольнике почвенных окрасок: Ч — черный, Б — белый, К — красный; отраженный свет: Ф — фиолетовый, С — синий, З — зеленый, Ж — желтый, О — оранжевый, К — красный, Б — белый, ИК — инфракрасное излучение).

Зависимость светоцветового информационного образа почвы от ее состава

Целью разработки светоцветового метода контроля почвы является определение содержания в ней органических веществ, влияющих на цветовые оттенки почвы, на основе анализа ее информационного образа. В связи с этим проведены исследования изменения светоцветового образа почвы в зависимости от состава почвенных образцов (рис. 3). При этом почвенные образцы формировались из темно-серой и светло-желтой почв (точками показаны на треугольнике почвенных окрасок). Анализ влияния состава почвы на величину коэффициента яркости показывает, что по мере увеличения количества темной почвы в образце происходит постепенное сужение светоцветового образа. Причем наиболее резкое изменение информационного образа наблюдается в том случае, когда в смеси преобладает светлая почва. Наибольшая деформация светоцветового образа происходит в области красного света, а наименее чувствительна к изменению состава почвы область синего света цветового образа.

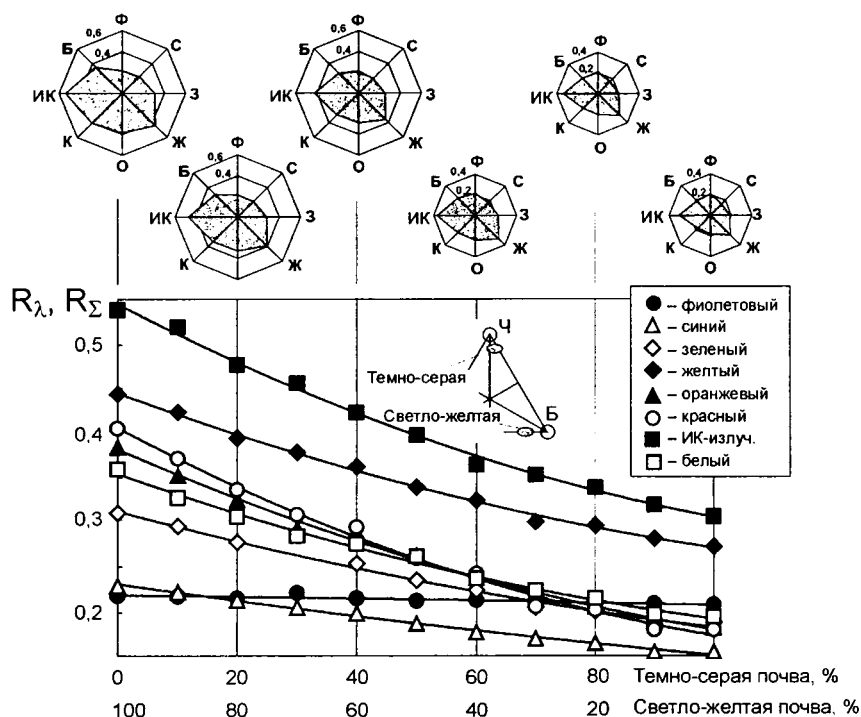


Рис. 3. Взаимосвязь между светоцветовым информационным образом почвы и ее составом.

Диапазон изменения коэффициента яркости, значения которого формируют светоцветовой информационный образ, составляет от 0,154 (почва темной окраски; синий свет) до 0,538 (светлый оттенок почвы; ИК-излучение). По мере увеличения количества темной почвы в образце коэффициент яркости плавно снижается, причем более резкое уменьшение данного коэффициента наблюдается в том случае, когда в смеси преобладает светлая почва и, соответственно, более плавное уменьшение коэффициента яркости происходит в случае преобладания темной почвы в смеси. Наибольшее изменение коэффициента яркости почвенного образца светлого оттенка при добавлении темной почвы наблюдается в случае использования для контроля красного света — 2,26 раз. Далее цвета отраженного света по мере уменьшения коэффициента яркости располагаются в следующий ряд: оранжевый — 2,12; белый — 1,86; ИК-излучение — 1,76; зеленый — 1,65; желтый — 1,63; синий — 1,48 раз.

Изменение цветоцветовых информационных образов почвы в зависимости от ее влажности

Влажность почвы оказывает значительное влияние на ее цветовые характеристики и, следовательно, на точность контроля отражательных свойств, цветоцветовых образов и итоговые показатели качества. С учетом этого исследовали изменение цветоцветовых информационных образов при различной влажности почвенных образцов (рис. 4). Содержание воды выбирали в диапазоне 0–50% (по массе) и измеряли коэффициент яркости почвенного образца при различных цветовых параметрах отраженного оптического излучения. Исследования проводили с использованием почвенных образцов, имеющих светло-серую окраску.

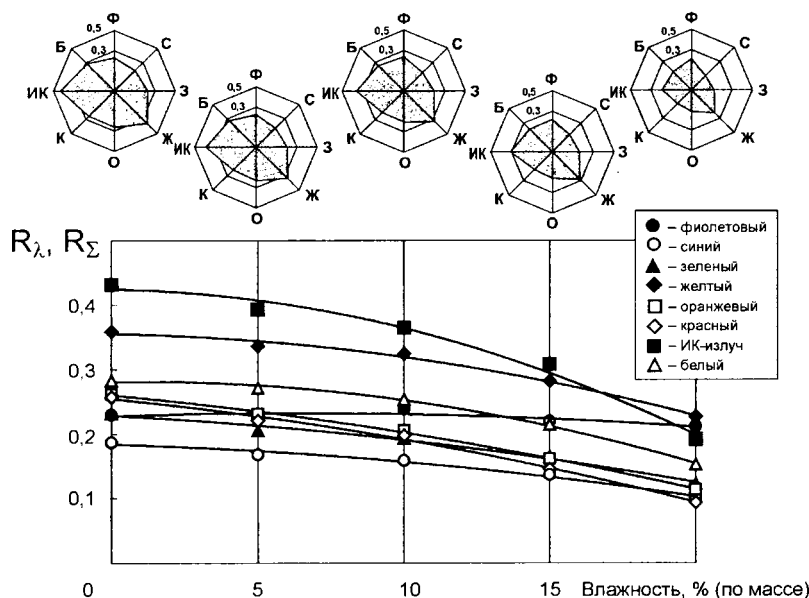


Рис. 4. Зависимость цветоцветового информационного образа почвы от ее влажности.

С увеличением содержания воды коэффициент яркости плавно снижается. Наибольший перепад значений данного коэффициента наблюдается для красного света (63%). Далее цвета отраженного света по мере уменьшения относительного значения изменения коэффициента яркости располагаются в следующий ряд: оранжевый свет (57%), ИК-излучение (56%), зеленый (47%), белый и синий (по 46%), желтый (37%), фиолетовый (8%). Полученная зависимость объясняется тем, что с увеличением влажности почва приобретает более темную окраску.

Увеличение содержания воды с 20 до 35–40% (по массе) приводит к росту коэффициента яркости почвенных образцов, а дальнейшее повышение влажности до 50% (по массе) слабо влияет на все спектральные коэффициенты яркости, кроме случая использования ИК-излучения. В диапазоне влажности 35–50% (по массе) коэффициент яркости для ИК-излучения резко снижается. Указанные зависимости показателя отражения обусловлены тем, что основной отражающей компонентой смеси почва–вода при содержании воды 0–20% (по массе) является увлажненная почва, а при содержании 20–50% (по массе) основная отражающая компонента — вода, скрывающая частицы почвы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Колешко В. М., Гулай А. В., Лученок С. А. Светоцветовой метод эволюционной диагностики почв для технологии точного земледелия // Межведомственный сборник научно-методических статей «Теоретическая и прикладная механика» — Вып. 20, 2006 г. — с. 198–208.
2. Колешко В. М., Гулай А. В., Лученок С. А. Сенсорная система для экспресс-диагностики почвы в технологии точного земледелия // Международная научно-техническая конференция «Сенсорная электроника и микросистемные технологии», Одесса, 26–30 июня 2006 г. / Тезисы докладов — с. 246.
3. Колешко В. М., Лученок С. А. Интеллектуальные системы контроля и управления технологией точного земледелия и переработки сельхозпродукции // Торговые и деловые известия белорусских предпринимателей. Приверженность разуму. — 2004, № 13–14. — с. 23.
4. Колешко В. М., Гулай А. В., Лученок С. А. Нейросетевые технологии — базис создания интеллектуальных систем точного земледелия // Материалы Второго Белорусского Космического Конгресса, 25–27 октября 2005 г., Минск — с. 376–380.
5. Колешко В. М., Гулай А. В., Лученок С. А. Интеллектуальные сенсорные системы для технологии точного земледелия // Международная научно-практическая конференция «Научно-инновационная деятельность и предпринимательство в АПК: проблемы эффективности и управления», 16–18 февраля 2006 г., Минск / Сборник статей. — с. 115–118.
6. Колешко В. М., Гулай А. В., Лученок С. А. Интеллектуальные мехатронные системы в машиностроении для точного земледелия / Сб. «Машиностроение», Минск. — 2006 г. — Вып. 22. — с. 105–109.