

СВЕТОЦВЕТОВОЙ МЕТОД ЭВОЛЮЦИОННОЙ ДИАГНОСТИКИ ПОЧВ ДЛЯ ТЕХНОЛОГИИ ТОЧНОГО ЗЕМЛЕДЕЛИЯ

Колешко В. М.¹, Гулай А. В.^{1, 2}, Лученок С. А.²

Разработан эллипсометрический метод контроля качества почвы в режиме реального времени по ее спектральной (цветовой) отражательной способности. Создана мобильная интеллектуальная мультисенсорная система для построения электронных почвенных карт в технологии точного земледелия. Исследовано изменение спектрального коэффициента отражения оптического излучения в зависимости от почвенной окраски. Проведен анализ зависимости отражательной способности почвы от содержания в ней органических веществ.

Замечательным инструментом исследования свойств почвы и изменений, которые происходят с ней под влиянием человеческой деятельности, является изучение цвета почвы [1]. Количественно и, следовательно, наиболее полно и объективно цветовые характеристики почвы определяются ее спектрами отражения. Измеряемые параметры отражения оптического излучения позволяют диагностировать генетические горизонты почвы, почвенные типы и подтипы. Показатели отражательной способности почвы указывают на содержание гумуса, некоторых соединений железа, карбонатов, сульфатов, хлоридов. Они позволяют также оценивать масштабы засоления почвы, ее загрязнение нефтепродуктами, степень повреждения. Одним из перспективных применений параметров отражательной способности почв является составление электронных почвенных карт различного масштаба. Измерение спектров отражения почвой оптического излучения производится с использованием спутниковых технологий, авиационных средств, а также методов приповерхностного контроля почвы.

Однако, несмотря на впечатляющие достоинства светоцветового метода контроля почвы, он остается до настоящего времени недостаточно востребованным. Слабый интерес к данной проблеме как разработчиков сенсорных систем для диагностики почвы, так и потребителей этих систем – специалистов сельского хозяйства обусловлен, на наш взгляд, следующими обстоятельствами:

- недооценкой специалистами цвета почвы как одного из важнейших свойств, отражающих ее качество, и отсутствием в связи с этим общественного заказа на светоцветовые методы контроля почвы;
- отсутствием в физике и химии почв достаточно полной теории отражения света почвами, на основе которой было бы возможно создание достоверных и точных светоцветовых методов контроля качества почвы;
- недостаточным уровнем развития многофункциональных сенсорных систем, на базе которых разрабатывалось бы контрольно-измерительное оборудование для оценки цветовых свойств почвы как многопараметровой характеристики.

В связи с вышеизложенным особую актуальность и значимость приобретает разработка мобильной интеллектуальной сенсорной системы для определения характеристик отражения оптического излучения в гумусово-аккумулятивном горизонте почвы. По результатам измерения спектральных параметров отражательной способности почвы с использованием данной системы создаются точные крупномасштабные электронные карты содержания в ней органических веществ, на основе которых при внедрении технологий точного земледелия строится вся стратегия ведения полевых работ в сельскохозяйственной фирме.

Концептуальные основы создания мобильной оптической сенсорной системы для диагностики почвы

Наиболее приемлемым техническим решением для контроля почвы в режиме реального времени с целью создания электронных карт содержания в ней органических веществ является разработка автономных подвижных систем диагностики, не связанных с выполнением

других агротехнологических операций. Для проведения оперативного контроля почвы в качестве агрегатов, несущих сенсорные устройства, используются, как правило, мини-тракторы или легковые автомобили, обеспечивающие необходимое усилие тяги и требуемый скоростной режим, а также имеющие достаточно высокую проходимость. Достоинства автономных систем контроля качества почвы заключаются в следующем:

- процесс диагностики может проводиться в оптимальные для этого сроки, отличные от достаточно сжатых сроков выполнения полевых работ в агротехнологической цепи;
- траектория движения агрегата, несущего сенсорную систему, выбирается только с точки зрения обеспечения контроля без увязки с другими технологическими процессами;
- возможна реализация многократного, периодического контроля одних и тех же полей с целью определения динамики процессов накопления или потери почвой органических веществ.

С точки зрения реализации разработанного способа контроля качества почвы предъявляемым требованиям отвечает мини-трактор Беларус-112Н (Беларус-132Н): четырехколесный с шарнирносочлененным остовом, выполненный по схеме 4x4 и предназначенный для ведения сельскохозяйственных работ с навесными, полунавесными и прицепными агрегатами [2]. Скорость мини-трактора составляет 2,83–17,22 км/ч, что обеспечивает возможность оперативного проведения операции мониторинга почвы с приемлемой точностью и составление электронных почвенных карт с достаточно высокой разрешающей способностью. Мини-трактор имеет гидронавесное устройство, технические данные которого позволяют производить подъем в транспортное положение навесных агрегатов, в том числе устройства реализации оптического способа контроля качества почвы, и заглубление данного устройства в почву в рабочем режиме. Для введения электронно-оптического сенсорного модуля в почву на необходимую глубину разработано устройство на базе серийного прицепного агрегата к данному мини-трактору (рис. 1). Разработанное устройство позволяет выдерживать заданную величину заглубления в течение всего процесса мониторинга, то есть “копировать” поверхность почвы. Глубина контролируемого слоя почвы выбирается на основе анализа строения профиля почвы и его особенностей, характерных для Беларуси.

Особенности почв Беларуси обуславливаются расположением страны на юго-западе обширной дерново-подзолистой зоны: северная часть территории Беларуси входит в Прибалтийскую, а южная – в Белорусскую провинцию южно-таежной зоны дерново-подзолистых почв. Поэтому следует учитывать тот факт, что данный тип почв характерен для значительной части территории Беларуси [3]. Причем дерново-подзолистые автоморфные (незаболоченные) почвы занимают 42,4% территории, они содержат 0,8–2,0% гумуса. Дерново-подзолистые полугидроморфные (заболоченные) почвы, подвергающиеся различным технологиям мелиорации, занимают 25,3% территории (содержат 2,0–3,5% гумуса). Для дерново-подзолистых почв характерно расположение гумусово-аккумулятивного горизонта на глубине от 20–30 мм до 180–200 мм [4]. Качество почвы в значительной степени зависит от состава и насыщенности органическими веществами именно этого слоя, в связи с чем его контроль представляет наибольший интерес. Более мощным перегнойным горизонтом (до 300–700 мм) характеризуются дерново-карбонатные почвы, однако они занимают всего 0,2% территории Беларуси.

На поверхности гумусово-аккумулятивного слоя расположена подстилка, а ниже его находится осветленный элювиальный (отмытый) горизонт. Свойства подстилки в наибольшей степени зависят от атмосферных условий: она быстрее других слоев почвы как насыщается влагой, так и освобождается от нее. В связи с этим также предпочтителен контроль гумусово-аккумулятивного горизонта, обладающего более стабильными характеристиками. Он в меньшей степени подвержен насыщению влагой, которая является основным фактором, отрицательно влияющим на точность контроля содержания органических веществ в почве. Таким образом, наиболее оптимальным методом оптического контроля качества почвы явля-

ется заглублиение оптического сенсора в среднем на 80-150 мм с тем, чтобы он с наибольшей вероятностью проходил в гумусово-аккумулятивном горизонте. Следует отметить, что дерново-подзолистые почвы Беларуси нуждаются в коренном улучшении, в дифференцированном внесении удобрений и регулировании водного режима. Эффективное выполнение данных технологий возможно с использованием точного и достоверного метода контроля качества почв. Поэтому вышеизложенные соображения были положены в основу разработки метода мониторинга почвы по величине показателя отражения оптического излучения в ее гумусово-аккумулятивном горизонте.

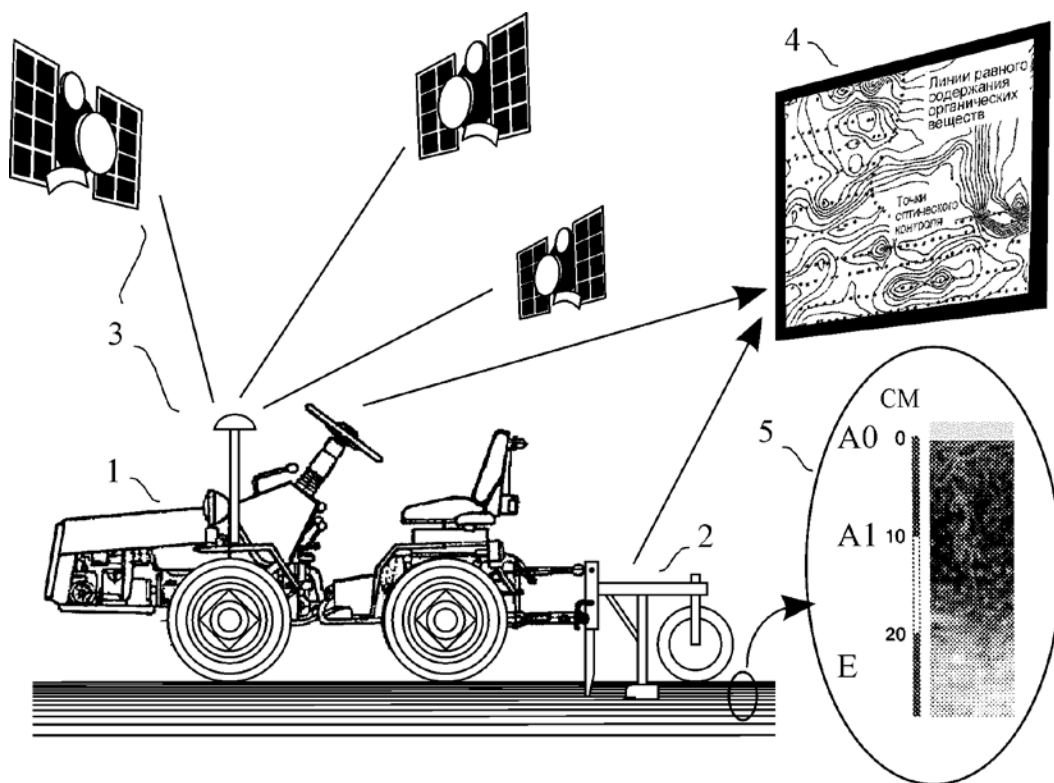


Рис. 1. Мобильный агрегат для диагностики почвы: 1 – мини-трактор; 2 – устройство для контроля почвы; 3 – система спутниковой навигации; 4 – электронная почвенная карта; 5 – структура слоев почвы (A0 – подстилка; A1 – гумусово-аккумулятивный горизонт; E – осветленный элювиальный (отмытый) горизонт).

Создание интеллектуальной системы обработки информации о спектральной отражательной способности почвы для построения электронной почвенной карты проводится с использованием нейросетевого алгоритма [5, 6]. Обучение нейронной сети выполняется по экспериментальным значениям коэффициента отражения от образцов почвы, цвет которой выбирается 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. Вышеуказанный треугольник окрасок не вводит единых приемов и критериев оценки цвета почвы, но указывает порядок приготовления почвенных образцов разной окраски при обучении интеллектуальной системы распознавания образов для технологии точного земледелия.

Одним из вариантов интеллектуальной системы для построения электронной почвенной карты является нейросетевая экспертная система идентификации почв с помощью атласа цветов почвы, в котором каждая окраска характеризуется тоном (оттенком), интенсивностью окраски и чистотой спектрального цвета. В качестве основных тонов в данном атласе, получившем международное признание, взяты красный, желтый, зеленый, синий и фиолетовый, на основе которых создано большое число нарисованных. Идентификация цвета исследуемой

почвы с электронными образами интеллектуальной системы, созданными в соответствии с атласом, позволяет приписать каждой точке поля конкретный цвет и записать его условную формулу. Данный способ создания почвенных карт вводит определенное единообразие в оценку и наименование цветов почвы, которые в дальнейшем сопоставляются с ее качеством.

Мобильный агрегат для мониторинга почвы оснащается системой спутниковой навигации GPS, Глонасс или Galileo для привязки точек оптического контроля почвы к координатам местности. Учитывая, что точность определения координат на основе спутниковых технологий недостаточна для создания электронных почвенных карт (составляет порядка 10 м), для этой цели может быть использована система радиомаяков или любая другая более точная система позиционирования.

Приборное обеспечение реализации спектрального оптического метода контроля качества почвы

Для измерения коэффициента отражения в широком спектральном диапазоне в состав разработанного электронно-оптического блока сенсорной системы включены источник и датчик оптического излучения, размещенные в корпусе и соединенные с устройством обработки информации (рис. 2). Оптический луч от источника направлен на исследуемую поверхность почвы, а отраженный от этой поверхности световой поток принимается датчиком. Корпус защищает исследуемую поверхность, источник и датчик от естественного света с целью снижения неконтролируемого влияния его на результаты измерений. По параметрам отраженного от почвы оптического излучения судят об окраске почвы и о содержании в ней органических веществ. Сигнал с выхода оптического датчика обрабатывается с помощью микроконтроллера, который сравнивает получаемые данные с экспериментальными характеристиками почвы на локальных участках поля.

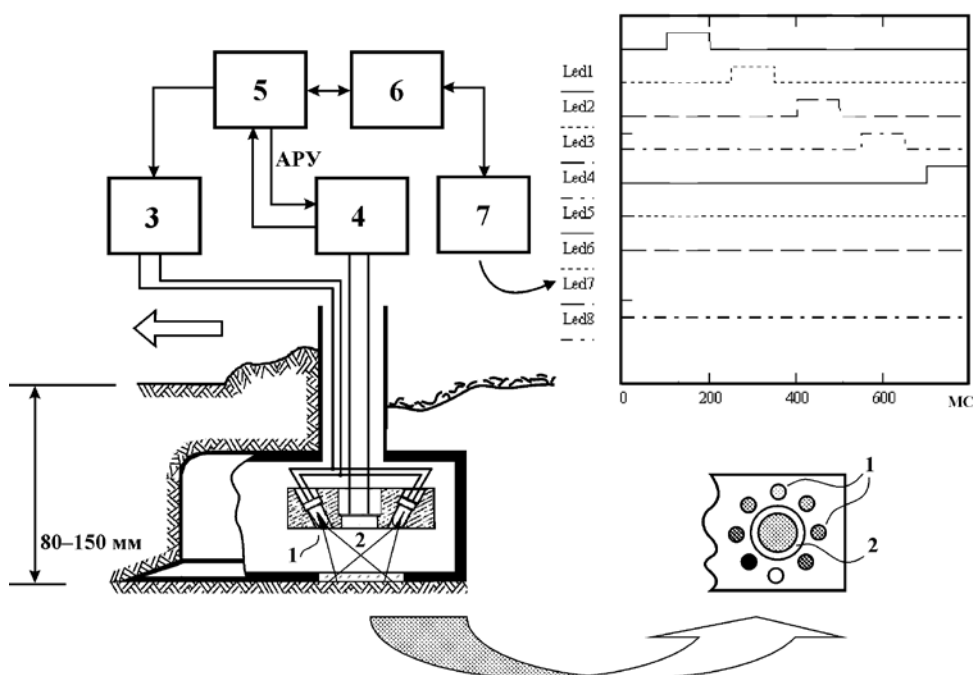


Рис. 2. Сенсорная система для цветоцветового контроля почвы: 1 — набор светодиодов; 2 — фотоприемник; 3 — усилитель формирующих импульсов; 4 — электронный блок фотоприемника; 5 — модуль микроконтроллера с АЦП и ЦАП (APU — автоматическая регулировка усиления); 6 — модуль согласования; 7 — компьютер; 8 — формируемые импульсы.

В качестве источника оптического излучения при спектрометрических исследованиях почвы применяются как разрядные, так и полупроводниковые приборы. Применяемые разрядные лампы с замкнутыми циклами в парах химических соединений (прежде всего метал-

логалогенные лампы) подобны различным типам ртутных ламп, однако имеют принципиальное отличие от них, заключающееся в том, что кроме ртути и зажигающего инертного газа они содержат химические соединения металлов, в частности их галогенные (иодистые) соединения, определяющие спектр оптического излучения. Данные лампы (в сравнении с полупроводниковыми приборами) характеризуются относительно высокой мощностью (более 25 Вт) и достаточно большими габаритными размерами (полная длина составляет более 50 мм). Поскольку металлогалогенные лампы имеют широкий спектр оптического излучения, для приема его спектральных составляющих при исследовании коэффициента отражения необходимо применение набора узкополосных оптических фильтров. Указанные особенности разрядных приборов обуславливают повышенные значения рассеиваемой мощности, большие габаритные размеры, низкие показатели надежности и небольшой срок службы устройств контроля на основе металлогалогенных ламп.

В связи с вышеизложенным более предпочтительным является выбор полупроводниковых светодиодов в качестве источников излучения в устройствах оптического мониторинга почвы. Суперяркие светодиоды (SLD – Super Luminescent Diode) представляют собой полупроводниковые приборы с торцевым излучением, то есть приборы, излучающие свет параллельно поверхности рп-перехода [7]. Такие светодиоды по параметрам излучения конкурируют с полупроводниковыми лазерами и используются вместо лазеров в тех случаях, когда высокая когерентность оптического излучения и малый угол расхождения луча являются отрицательными факторами при освещении объекта, например, контролируемой поверхности почвы. Одной из причин, предопределяющих предпочтение суперярких светодиодов перед полупроводниковыми лазерами, в нашем случае является необходимость освещения диффузно отражающей поверхности почвы и приема отраженного от этой поверхности оптического луча. Более того, случайный характер изменения структуры почвы при использовании лазерного излучения значительно влиял бы на отклонение оптического луча, что нежелательно, так как приводило бы к увеличению погрешности измерения и снижению точности контроля качества почвы.

Выбор светодиодов, изготовленных из разных полупроводниковых соединений, позволяет создать многомерное сенсорное устройство для контроля почвы в диапазоне от фиолетовой до инфракрасной области оптического спектра. Один из основных параметров применяемых светодиодов – длина волны центра спектра излучаемого света лежит в диапазоне от 400 нм (фиолетовые) до нескольких тысяч нанометров (инфракрасные); ширина спектра излучения составляет порядка 5 нм. Угол расхождения луча равен 20° (светодиоды имеют на излучающем торце выпуклую линзу). Импульсная модуляция интенсивности излучения светодиода производится путем изменения инжекционного тока. Поскольку максимальное значение частоты модуляции f_m определяется временем перехода инжектированных носителей t_s , сопровождаемого спонтанным излучением, то есть продолжительностью спонтанного излучения ($f_m = 1/2 \pi t_s$) и достигает ~ 10 МГц, параметры быстрогодействия оптического модуля вполне согласуются с требующейся разрешающей способностью сенсорного устройства для создания электронных почвенных карт. Долговечность спонтанного излучения (при температуре 20°C и даже 60°C) может достигать 10^5 – 10^9 часов, что отвечает требованиям наработки на отказ систем мониторинга почвы. Датчиком отраженного от почвы оптического излучения служит фотодиод, подключенный к системе обработки информации.

Структурно система обработки информации состоит из следующих узлов: модуля аналого-цифрового преобразователя с микроконтроллером ADuC812; модуля формирования импульсов и связи. Комплект указанных модулей предназначен для формирования оптических импульсов светодиодов и регистрации откликов фотодиода в выходном файле данных. Модуль связи посредством интерфейса RS232 подключается к компьютеру и обеспечивает подачу управляющих импульсов на светодиоды. Формирование рабочих уровней сигналов для интерфейса обеспечивается микросхемой MAX3232. Модуль аналого-цифрового преоб-

разователя считывает сигналы с фотодиода и передает данные в компьютер через модуль связи. Программа управления электронно-оптическим блоком в режиме проведения экспериментальных работ позволяет: формировать цикл следования оптических импульсов; задавать число циклов работы; выбирать параметры выходных сигналов; сохранять установки и файл данных; отображать значение текущего отсчета. При этом электронным блоком обеспечиваются следующие параметры сигналов:

- максимальный ток через светодиод до 40 мА,
- минимальная длительность импульса 1 мс,
- максимальная длительность импульса 500 мс,
- смещение импульса в цикле 0–500 мс.

Исследование спектрального коэффициента отражения оптического излучения в зависимости от почвенной окраски

Физические основы цветосветовых методов контроля характеристик материалов в зависимости от длины волны и спектрального состава оптического излучения (как когерентного, так и некогерентного) изложены в [8]. Принципы оптического метода оценки качества почвы по ее спектральной отражательной способности основаны на следующих представлениях. Контролируемая поверхность сформирована почвенными агрегатами различных размеров, между которыми имеются зазоры, образующие поровое пространство, поэтому падающий на такую поверхность световой пучок отражается во всех направлениях (диффузно). Благодаря наличию большого числа агрегатов почвы, на которых падающее оптическое излучение претерпевает отражение и поглощение, при определении оптических характеристик контролируемого слоя почвы привлекаются представления, развитые для случая прохождения света через поглощающие и рассеивающие среды.

Теоретический анализ оптических характеристик диффузно рассеивающей поверхности производится при рассмотрении плоского слоя толщиной x_0 , равномерно и диффузно облучаемого с одной стороны монохроматическим излучением. При этом принимается, что поглощающие и рассеивающие центры распределены равномерно по всему объему слоя, а число их так велико, что рассеяние и поглощение можно считать непрерывными функциями толщины слоя. Допускается также, что размеры поверхности слоя настолько превосходят его толщину, что слой можно рассматривать как бесконечно протяженный. В этом случае воображаемая плоскость на глубине x вследствие рассеяния излучения в слое будет облучена с обеих сторон.

Значения прямой (со стороны падающего излучения) и обратной облученности воображаемой плоскости на глубине x позволяют определить величины коэффициентов отражения ρ и пропускания τ плоского слоя толщиной x_0 (при $x = x_0$):

$$\rho = sh(Lx_0) / sh[Lx_0 - \ln\rho(\infty)], \quad (1)$$

$$\tau = sh[-\ln\rho(\infty)] / sh[Lx_0 - \ln\rho(\infty)]. \quad (2)$$

Коэффициент поглощения α определяется формулой:

$$\alpha = 1 - (\rho + \tau) \quad (3)$$

и достаточно просто может быть получен из выражений (1), (2). Значения $\rho(\infty)$ и L в приведенных выражениях равны:

$$\rho(\infty) = 1 + (k/s) - \sqrt{(k/s)^2 + 2(k/s)}, \quad L = \sqrt{k^2 + 2ks}, \quad (4)$$

где $\rho(\infty)$ — коэффициент отражения бесконечно толстого слоя ($x_0 \rightarrow \infty$); k — показатель поглощения излучения, зависящий от длины волны и не зависящий от размера частиц; s — показатель рассеяния излучения, зависящий от длины волны и пропорциональный общей площади поперечного сечения частиц в единице объема.

Следует отметить, что выражения (1), (2) получены в предположении, что диффузно (не направленно) падающее излучение остается вполне диффузным и внутри всего светорассеивающего слоя, а величины k и s не зависят от глубины слоя и от направления падения излучения. Условие диффузности падающего излучения выполняется в нашем случае при достаточно больших углах расхождения луча светодиода. Относительно изменений параметров k и s в рассматриваемом слое можно предположить следующее: значительный разброс размеров частиц почвы и плотности их размещения будет оказывать в действительности существенное влияние на рассеяние излучения в слое. При выводе формул (1), (2) принималось также, что отражение бесконечно тонкого слоя dx обусловлено только рассеянием света, а пропускание – рассеянием и поглощением:

$$r(dx) = sdx, \quad t(dx) = 1 - (s + k)dx, \quad (5)$$

где $r(dx)$, $t(dx)$ — соответственно коэффициенты отражения и пропускания бесконечно тонкого слоя dx .

Анализ представленных выражений показывает, что сильная зависимость показателей s и k от длины волны обуславливает сложный характер изменения коэффициентов отражения ρ , пропускания τ и поглощения α по спектру оптического излучения. Кроме того, указанные коэффициенты следующим образом зависят от толщины слоя x_0 : при увеличении толщины от 0 до x_0 коэффициент отражения слоя ρ возрастает от 0, асимптотически приближаясь к $\rho(\infty)$; коэффициент пропускания τ падает от 1 до 0, а коэффициент поглощения α увеличивается от 0, асимптотически приближаясь к значению $1 - \rho(\infty)$. Следует отметить, что коэффициент отражения $\rho(\infty)$ имеет сильную зависимость от соотношения показателей поглощения k и рассеяния s . С ростом k/s величина $\rho(\infty) \rightarrow 1$, при этом также $L \rightarrow k$ и в предельном случае, при $k \gg s$ ($L = k$, $\rho(\infty) = 1$) облученность рассматриваемой плоскости определяется выражениями:

$$E_1(x) = E_0 \exp(-kx), \quad E_2(x) = 0, \quad (6)$$

где $E_1(x)$, $E_2(x)$ — облученность плоскости на глубине x соответственно со стороны падающего излучения и с противоположной стороны; E_0 — облученность на поверхности слоя со стороны падающего излучения.

Экспериментальные исследования отражательной способности почвы проводятся с использованием следующих показателей:

$$\rho, R = I/I_0, \quad (7)$$

где I – интенсивность отраженного света от почвенной пробы; I_0 – интенсивность падающего на поверхность почвы света (при этом ρ — коэффициент отражения) или интенсивность света, отраженного от идеально белой поверхности на месте почвенной пробы (в этом случае R – коэффициент яркости). Показатели ρ , R могут быть интегральными (ρ_Σ, R_Σ), когда они характеризуют отражение во всем интервале длин волн видимой области спектра, или спектральными (ρ_λ, R_λ), если они измеряются при определенных длинах волн. Для определения спектрального показателя отражения используются суперяркие светодиоды следующих цветов: фиолетовый, синий, зеленый, желтый, оранжевый, красный, инфракрасный, а для измерения интегрального коэффициента отражения применяется светодиод белого цвета. Светодиоды располагаются равномерно по длине окружности диаметром 20 мм с наклоном $\sim 10^\circ$ относительно вертикали, в центре окружности размещается фотоприемник; высота расположения светодиодов над контролируемой поверхностью составляет 30 мм.

Следует отметить, что по мере увеличения стабилизированного тока питания светодиодов с 5 до 20 мА, что соответствует пропорциональному увеличению интенсивности излучения, отражение возрастает во всем исследованном диапазоне длин волн (рис. 3). Общий ход

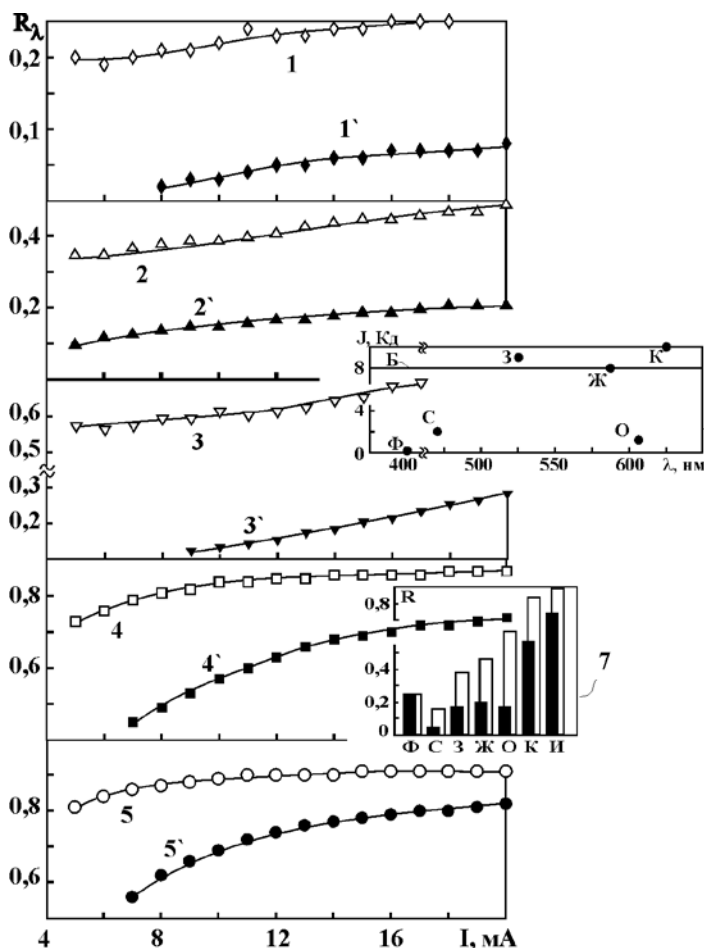


Рис. 3. Зависимость показателя отражения от интенсивности и длины волны оптического излучения: 1, 1' — синий цвет; 2, 2' — зеленый; 3, 3' — желтый; 4, 4' — красный; 5, 5' — ИК-излучение; 1–5 — для светлой почвы; 1'–5' — для темной почвы; 6 — спектр излучения светодиодов; 7 — показатель отражения ($I = 10$ мА).

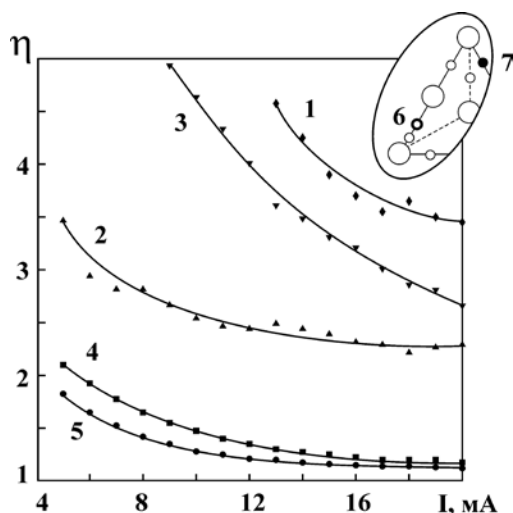


Рис. 4. Отношение коэффициентов отражения оптического излучения от светлой и темной почв: 1 — синий цвет; 2 — желтый; 3 — зеленый; 4 — красный; 5 — ИК-излучение; 6, 7 — расположение цветовых оттенков исследуемых почв (соответственно светло-каштановой и

полученных зависимостей спектральных коэффициентов отражения от длины волны вполне соответствует общепринятым взглядам на спектральную отражательную способность почв. Повышение коэффициента отражения происходит с увеличением длины волны от фиолетовой до инфракрасной области спектра. При этом отражение от более светлой почвы во всем видимом диапазоне значительно выше, чем от почвы, имеющей более темную окраску. Так, если в случае освещения излучением синего цвета коэффициент яркости R равен 0,20–0,27 и 0,02–0,08 (соответственно для светлой и темной почв), то в случае использования излучения другого цвета R равно соответственно: 0,30–0,49 и 0,10–0,21 (зеленый цвет), 0,56–0,73 и 0,02–0,28 (желтый цвет), 0,71–0,87 и 0,34–0,74 (красный цвет), 0,81–0,91 и 0,45–0,82 (ИК-излучение).

Разрешающая способность устройств для реализации цветоцветового метода контроля (как параметр, от которого существенно зависит точность расшифровки сходных оптических характеристик разных по физическим свойствам почв и, соответственно, четкое разделение различных контуров на электронных почвенных картах) определяется соотношением измеряемых сигналов при отражении излучения от светлой и темной почв. В связи с этим определяется отношение коэффициентов яркости для разных длин волн оптического спектра при контроле почвы, имеющей светлую и темную окраску (рис. 4). Здесь стоит подчеркнуть, что для проведения экспериментов готовились образцы почв, цвет которых близок к оттенкам, размещенным в вершинах треугольника почвенных окрасок. Полученные значения отношения коэффициентов яркости светлой и темной почв лежат в диапазоне от 1,2 до 4–5 и более, причем увеличение данного отношения происходит с уменьшением длины волны, а также по мере снижения интенсивности оптического

Зависимость между отражением оптического излучения и содержанием в почве органических веществ

Основными факторами, влияющими на отражение оптического луча от контролируемой поверхности почвы, наряду с содержанием в ней органических веществ, являются: неровность отражающей поверхности, структура поверхностного слоя, содержание влаги в почве, наличие соединений железа. Влияние данных факторов учитывается при выборе параметров контроля в процессе разработки оптического способа и оборудования для его реализации, а также непосредственно в процессе организации процедуры мониторинга почвы на контролируемом участке поля.

Неровность поверхности почвы, как один из очевидных факторов, влияющих на отражение оптического излучения, определяется набором агротехнологических приемов, которые используются для обработки поля в предшествующий контролю период. Кроме того, при анализе данного параметра учитывается также наличие в поверхностном слое почвы растительных остатков предыдущих урожаев. При использовании разработанного способа контроля заглубление оптического сенсора ниже слоя подстилки и формирование контролируемого участка почвы с помощью отполированной нижней поверхности корпуса сенсорного модуля позволяет избавиться от влияния такого негативного фактора как неровность почвы. Более того, применение источников света, имеющих достаточно большой угол расхождения луча, позволяет контролировать пятно освещения значительной площади, что также снижает погрешность измерений из-за неровности почвы.

Важным параметром, влияющим на результаты контроля по величине оптического отражения, является структура почвы, то есть распределение частиц минерального вещества, размеры которых меньше ~ 2 мм. Размеры частиц влияют на величину показателя рассеяния s , которая прямо пропорциональна общей площади поперечного сечения частиц в единице объема Q_1 . 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, как следует из выражений (1), (4), тем выше коэффициент отражения ρ . В частности, отражение увеличивается экспоненциально с уменьшением размера частиц почвы от 2,5 мм до 25 мкм. Для снижения влияния изменений структуры на точность контроля исследуемое поле разбивают на участки с одинаковой структурой почвы и сравнение отражательной способности почвы производят в пределах этих участков.

В значительной степени точность определения содержания органических веществ в почве зависит от ее влажности. Вода поглощает энергию электромагнитного излучения преимущественно в ИК-области: полосы поглощения излучения водой в диапазоне 1400–1900 нм представляют собой высшие гармонические составляющие основных частот (2660, 2730, 6270 нм), с которыми колеблются молекулы воды. Зависимость рассеяния света от количества содержания влаги имеет нелинейный характер: например, при изменении влажности почвы от 40 до 60% поглощение существенно не изменяется. На поверхностном уровне влажность почвы имеет сильную зависимость от многочисленных факторов, а с увеличением глубины распределение влаги в почве имеет более однородный характер. С учетом этого вполне обоснованным является выполнение оптического контроля почвы в пределах гумусово-аккумулятивного горизонта, расположенного на достаточной глубине.

Значительное влияние на процесс поглощения света оказывает содержание в почве соединений железа, в частности, его оксида. Это вещество в большей степени поглощает свет в ИК-диапазоне и в меньшей степени – в области желтого и красного света. В связи с этим для

уменьшения погрешности при контроле содержания органических веществ используется излучение преимущественно в тех областях спектра, в которых эффект влияния оксида железа снижается относительно других длин волн. При содержании органических веществ в почве больше 2% поглощение ими света перекрывает эффект поглощения за счет оксида железа. Поглощение оксидом железа становится важным фактором, влияющим на точность контроля, когда увеличены уровни содержания железа, унаследованные от почвообразующей породы, например, при использовании данного способа контроля на эродированной почве, поверхность которой разрушена и оксиды железа появляются в приповерхностных горизонтах.

Зависимость между коэффициентом отражения оптического излучения ρ и содержанием в почве органических веществ H в наиболее общем случае имеет нелинейный характер. Например, такая зависимость может быть выражена экспоненциальным уравнением:

$$\rho_{\lambda} = Ae^{-kH} + \rho_H, \quad (8)$$

где A, k — коэффициенты; ρ_H — минимальное значение коэффициента отражения при максимальном содержании органических веществ в почве. Численные значения коэффициентов A и k неодинаковы в различных почвах, что обусловлено, в частности, следующими факторами. Например, в черноземах, где много наиболее сильно окрашенных гуминовых веществ, покрывающих минеральные частицы плотным слоем, отражение резко падает по мере увеличения содержания гумуса. В дерново-подзолистых почвах снижение отражения более медленное, так как в данном случае в значительно большей степени проявляется влияние светлоокрашенной минеральной основы.

Между величинами ρ и H может также наблюдаться обратно пропорциональная зависимость:

$$\rho_{\Sigma} = B_0 + B_1H^{-1}, \quad (9)$$

где B_0, B_1 — коэффициенты. Значения B_0, B_1 определяются экспериментальным путем для каждого типа почв на конкретных участках поля. В частности, они могут определяться по результатам лабораторного анализа содержания органических веществ на выделенных участках путем решения уравнения (9) относительно B_0, B_1 . Затем значения данных коэффициентов вводятся в процессор и используются для расчета контролируемой величины H на участках с аналогичным типом почвы. На наш взгляд, нелинейные зависимости между коэффициентом отражения оптического излучения и содержанием органических веществ могут быть аппроксимированы также другими математическими выражениями.

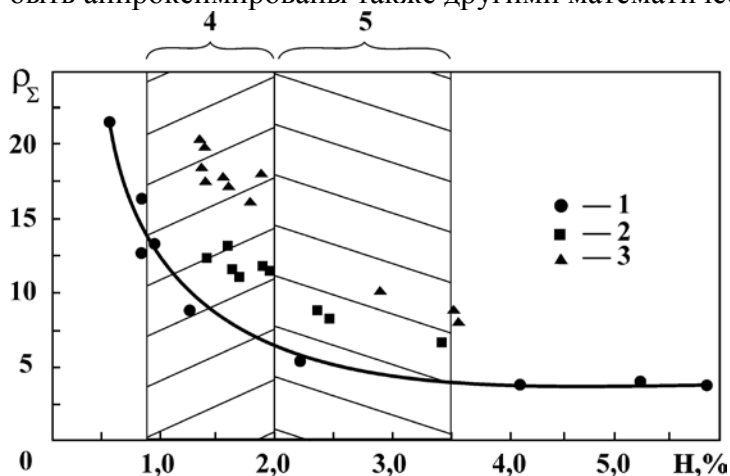


Рис. 5. Зависимость между содержанием органических веществ в почве и отражением оптического излучения: 1–3 — значения параметра отражения для разных типов почв на

Экспериментальные значения коэффициента отражения, полученные для разных типов почв на различных участках, с достаточной точностью характеризуют нелинейную зависимость данного коэффициента от содержания органических веществ (рис. 5). Здесь следует указать также, что наибольшее значение крутизны данной характеристики, от которого зависит точность и разрешающая способность метода контроля, находится в диапазоне содержания органических веществ от 0,8 до 3,5%, характерном для почв Беларуси. Полученные на почвах Беларуси

различных участках; 4, 5 — содержание органических веществ на дерново-подзолистых (соответственно автоморфных и полугидроморфных) почвах Беларуси.

значения интегрального коэффициента яркости также вполне согласуются с

известными результатами измерения показателя отражения оптического излучения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Михайлова Н. А., Орлов Д. С. Оптические свойства почв и почвенных компонентов. — М.: Наука, 1986. — 119 с.
2. Мини-тракторы Беларус-112Н и Беларус-132Н. Инструкция по эксплуатации и техническому обслуживанию. 132Н-00 00 010ИЭ.
3. Почвы Белорусской ССР. — Мн., 1974.
4. Афанасьева Т. В. Почвы СССР. — М.: Мысль, 1979. — 382 с.
5. 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. — № 13–14, 2004. — С. 23.
6. Колешко В. М., Гулай А. В., Лученок С. А. Нейросетевые технологии – базис создания интеллектуальных систем точного земледелия // Материалы Второго Белорусского Космического Конгресса. Минск, 25–27 окт. 2005 г. — С. 376–380.
7. Окоси Т. и др. Волоконно-оптические датчики. — Л.: Энергоатомиздат, 1990. — 256 с.
8. Колешко В. М., Гойденко П. П., Буйко Л. Д. Контроль в технологии микроэлектроники. — Мн.: Наука и техника, 1979. — 312 с.
9. Орлов Д. С. Химия почв. — М.: Изд-во МГУ, 1992. — 400 с.