

ДИСТАНЦИОННЫЙ И КОНТАКТНЫЙ ПРИБОРЫ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ СОСТОЯНИЯ РАСТЕНИЙ

© 2013 г. Э. В. Кувалдин, канд. техн. наук

ОАО “Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова”, Санкт-Петербург

E-mail: ekuvaldin@yandex.ru

Разработаны приборы для измерения коэффициентов отражения растений в видимой и ближней ИК областях спектра. Проведено сравнение результатов измерений контактным и бесконтактным рефлектометрами на различных растениях приусадебного участка в летние периоды 2010–2012 годов для выяснения достоинств и недостатков приборов и возможных путей их модернизации.

Ключевые слова: дистанционный рефлектометр, контактный рефлектометр, растения.

Коды OCIS: 120.0280, 120.4290, 120.5820.

Поступила в редакцию 26.12.2012.

Методы и приборы оперативной диагностики состояния и уровня минерального питания растений позволяют оценить и повысить урожай сельскохозяйственных культур. Это касается, прежде всего, озимых зерновых культур, вегетационные подкормки которых азотными удобрениями служат необходимым элементом их агротехнологии. Наиболее перспективными при работе с растениями следует считать контактные приборы и активные дистанционные приборы. Эти приборы работают в видимой и ближней инфракрасной (ИК) областях спектра оптического излучения и измеряют спектральные коэффициенты отражения (СпКО) солнечного излучения растениями. На кривой спектрального пропускания и отражения листьев, хвои, травы и мхов можно выделить четыре характерных зоны: видимая область примерно до 670 нм, характеризующаяся низким (7–15%) СпКО; зона 670–710 нм, соответствующая полосе поглощения хлорофила, в которой происходит резкое увеличение СпКО от растения; зона 720–1100 нм с высоким коэффициентом отражения и зона 1100–1600 нм, в которую входят полосы поглощения воды. Зависимости СпКО в этих зонах от содержания азота в почве и от других факторов плавные по

спектру, что позволяет использовать в приборах широкие спектральные интервалы, при этом получаются большие сигналы и меньшая зависимость от внешних помех. При больших сигналах имеется возможность уменьшить погрешности прибора и повысить достоверность определения требуемых показателей. Измеряемые образцы растений очень неоднородны по поверхности, и для того, чтобы получить хорошую воспроизводимость измерений на таких образцах, нужно их равномерно осветить со всех сторон или наблюдать в таких же условиях. Поэтому контактные приборы в основном строятся с геометриями измерения $D/0^\circ$ и $0^\circ/D$ (диффузное освещение/угол наблюдения). Хотя дистанционные приборы и менее точны, они более производительны. Если установить прибор на движущийся носитель, то с их помощью можно обследовать большие площади посевов. Принцип работы этих приборов одинаков во всех спектральных интервалах. В наиболее простых приборах определяется отношение СпКО в видимой области (СпКО_{вид}) к СпКО в ближней ИК области (СпКО_{ИК}), в которой (750–1000 нм) СпКО_{ИК} мало зависит от состояния растений. Поэтому СпКО в этой области может быть принят за опорную точку.

Энергетический расчет дистанционного прибора

В видимой области спектра, хотя абсолютное значение коэффициента отражения изменяется значительно по спектру, но относительное изменение от воздействующих факторов в довольно широком спектральном интервале меняется мало. Поэтому длины волн источников излучения как в видимой, так и в ИК области можно выбирать произвольно, опираясь на другие критерии. Одним из таких критериев может быть мощность источника излучения, его расходимость, коэффициент полезного действия и др. При использовании в качестве источника освещения светодиодов наибольшие сигналы на приемнике излучения могут быть получены от светодиодов с длинами волн излучения 650 и 910 нм.

В статье рассмотрены дистанционный и контактный приборы с активной подсветкой. В активном дистанционном тестере (АДТ) имеется два канала: красный и ИК. В приборе имеется импульсный излучатель, освещающий измеряемый объект, два фотоприемных устройства (ФПУ), оптическая система, формирующая угловое поле зрения прибора, и светофильтры, выделяющие заданные спектральные интервалы. При разработке прибора предполагалось, что он будет устанавливаться на движущийся носитель, вследствие чего расстояние до измеряемого объекта может значительно изменяться. Чтобы по возможности исключить влияние этого фактора на воспроизводимость показаний прибора, расстояние до объекта измерения было выбрано не менее одного метра при геометрии измерения $0^\circ / 0^\circ$, при которой на всех расстояниях ФТУ видит измеряемый объект.

Отраженный от образца поток излучения поступает на ФТУ двух измерительных каналов. Сигналы с выхода каждого канала после усиления масштабными усилителями поступают в аналого-цифровой преобразователь осуществляется (АЦП) и микропроцессорное устройство. Питание прибора производится от встроенного аккумулятора. По измеренному отношению СпКО в зонах 500–670 нм и 720–1100 нм можно определить состояние растения, в том числе, испытывает ли растение стресс от каких-либо воздействий из почвы или атмосферы. При соответствующей градуировке можно определить и количество внесенных в почву удобрений. Для реализации принципа построения и определения возможных характеристик прибора проведем его энергетический расчет.

В приборе имеется два канала: один для видимой области спектра, другой для инфракрасной. Отношение сигнала к шуму (С/Ш) будет при прочих равных условиях меньше в канале видимой области спектра, так как СпКО растительности в нем в несколько раз меньше, мощность излучения светодиодов на порядок меньше и чувствительность фотоприемника примерно в два раза меньше. Поэтому энергетический расчет целесообразно проводить для видимого канала; при этом в ИК канале все будет существенно лучше. В видимом канале прибора можно использовать сверхяркие светодиоды с мощностью излучения около 10 мВт в импульсном режиме работы. Для уменьшения влияния внешней засветки предполагается использовать импульсный режим освещения с частотой повторения около 10 Гц. Для устранения влияния низкочастотных шумов ФПУ и снижения потребляемой мощности излучатель работает с большой скважностью импульсов излучения. С учетом этих требований выбираем длительность импульса излучения 1×10^{-3} с. Энергия излучения в импульсе в этом случае составит 1×10^{-5} Дж. Конструктивно для увеличения мощности излучения можно использовать несколько светодиодов одновременно. В данной конструкции удобно использовать 6 светодиодов. Тогда общая энергия излучения составит $W_{\text{изл}} = 6 \times 10^{-5}$ Дж. Считаем, что поля зрения излучающего и приемного каналов согласованы и поток со всей освещаемой поверхности попадает на входной объектив ФПУ. Также считаем, что измеряемая поверхность зелени в пределах угла наблюдения отражает по закону Ламберта, т.е. коэффициент яркости по всем направлениям одинаков. В расчете можно также допустить, что угол освещения и наблюдения небольшой и поверхность, от которой отражается поток, можно заменить одной светящейся точкой. Тогда энергия отраженного сигнала от освещаемой поверхности будет пропорциональна отношению площадей фотоприемного объектива с радиусом r к площади полусферы с радиусом R , равным расстоянию от измеряемой поверхности до фотоприемного объектива. Учитывая, что коэффициент отражения растительности в видимой области спектра $\rho \approx 0,12$, а коэффициент пропускания полосового светофильтра ФПУ $\tau_2 \approx 0,5$, получаем энергию, попадающую в фотоприем-

ник: $W_{\text{фпу}} = W_{\text{изл}} \tau_1 \tau_2 \pi r^2 / (2\pi R^2) = 1,2 \times 10^{-9}$ Дж. Пороговая энергия ФПУ [1] $W_{\text{п}} = 4,5 \cdot 10^{-11} \text{С}^{0,5} / S_{\lambda}$. Емкость C выбранного фотодиода ФД263 с диаметром приемной площадки 5 мм примерно равна 100 пФ, спектральная чувствительность S_{λ} на длине волны 450–630 нм в среднем примерно составляет 0,2 А/Вт. Используя эти значения, получаем пороговую энергию ФПУ $W_{\text{п}} = 2,25 \times 10^{-14}$ Дж. Зная энергию, падающую на фотоприемник, можно сосчитать максимальный динамический диапазон всего устройства, определяемый параметрами входящих в него элементов: $D = W_{\text{фпу}} / W_{\text{п}} = 5 \times 10^4$. Для нормальной регистрации измеряемого сигнала цифровым прибором достаточно иметь $C/\text{Ш} = 1 \times 10^3$. Полученное значение D обеспечивает надежный запас, который позволяет либо уменьшить число светодиодов, либо увеличить расстояние до объекта измерения. Следует отметить, что полученное значение динамического диапазона реализуется только при идеальном выполнении прибора и при наличии достаточно большого коэффициента усиления в сигнальном тракте ФПУ. В расчете не учитывали различного рода помехи работе прибора, такие как попадание излучения напрямую из излучателя в приемный канал и внешняя засветка ФПУ солнечным излучением. Эти факторы могут существенно уменьшить динамический диапазон работы прибора. Прямое прохождение сигнала источника излучения можно оценить только экспериментально. Влияние солнечной засветки можно рассчитать. Максимальная спектральная плотность мощности излучения Солнца на поверхности земли в спектральном интервале 0,4–0,7 мкм составляет 56×10^{-3} Вт/см², в интервале 0,8–1,1 мкм – 27×10^{-3} Вт/см² [2]. Если прикрыть блендой вертикальную составляющую солнечного излучения, то рассеянный свет составит примерно 6–7 % от падающего излучения. Это соответствует 3,6 мВт/см². Площадь ФПУ с входным зрачком 50 мм равна 19,5 см². Тогда поток, попадающий на фотоприемник, равен 0,070 Вт. Квантовый выход селенового фотоэлемента или фотодиода в качестве приемника излучения в этой области спектра составляет примерно 50%. Коэффициент отражения от приемной поверхности 30%, чувствительность 0,2 А/Вт. Коэффициент пропускания оптической системы 0,6. Тогда ток I в цепи фотоприемника составит 8,4 мА. Шумовой ток в цепи приемника излучения $I_{\text{ш}} = (I/e\tau)^{1/2} e = 1,2 \times 10^{-12}$ А, где e – заряд электрона, τ – время измерения. Рассчитаем шумовой

ток сигнала. Напряжение тепловых шумов при комнатной температуре для реально изготовленного усилителя сигнала с фотоприемником по формуле Найквиста равно $U_{\text{ш}} = (4kTN\Delta f R)^{1/2} = 1,4 \times 10^{-6}$ В, где k – постоянная Больцмана, T – температура, $N = 10$ – коэффициент шума последующего усилителя или преобразователя, Δf – полоса пропускания усилителя, R – сопротивление нагрузки в цепи фотоприемника (определено экспериментально при отсутствии перегрузки прибора солнечным излучением). Разделив полученное напряжение шумов на сопротивление нагрузки $R = 5 \times 10^4$ Ом, получим шумовой ток $I = 2,8 \times 10^{-11}$ А. Сравнивая с шумами засветки от Солнца, видим, что шумовой ток солнечной засветки меньше тока тепловых шумов при самой мощной засветке. В спектральном интервале ИК канала он несколько меньше. Отсюда можно сделать вывод, что полупроводниковое ФПУ можно рассчитывать на максимальную чувствительность и главной проблемой при его разработке будет устранение перегрузки ФПУ мощным сигналом собственного излучателя, а также возможный переход в нелинейный режим по току приемника излучения. Кремниевый фотодиод при энергии падающего излучения $1,2 \times 10^{-9}$ Дж работает в линейном режиме.

В приборе используют два независимых канала регистрации, каждый в своем выбранном спектральном интервале. Результаты измерения в каналах поступают в общий микропроцессор, связанный с внешним компьютером. Каждый канал имеет свое собственное приемное устройство (рис. 1) и излучающие светодиоды с устройством формирования импульса питания светодиодов. Перед светодиодами и приемником излучения находятся линзы, формирующие требуемое угловое поле зрения прибора. В опорном канале также 6 излучающих светодиодов. Аналоговый сигнал с обоих каналов поступает на коммутатор и в аналого-цифровой преобразователь (АЦП), где происходит измерение электрического сигнала, пропорционального энергии отраженных от объекта измерения импульсов излучения. Микропроцессорное устройство вычисляет отношение результата измерения в измерительном канале к опорному. Это отношение выводится на индикатор прибора и поступает в компьютер по последовательному интерфейсу для дальнейшей обработки накопленной за цикл измерений информации. Калибровка прибора

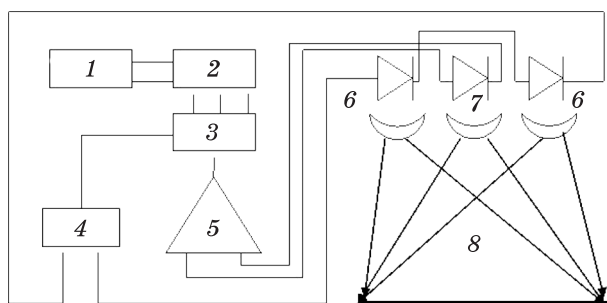


Рис. 1. Функциональная схема дистанционного прибора АДТ: 1 – компьютер, 2 – микропроцессор, 3 – АЦП, 4 – формирователь, 5 – усилитель, 6 – светодиод с линзой, 7 – фотодиод с линзой, 8 – испытуемый образец.

проводится по эталону отражения. Внешний вид прибора показан на рис 2.

В качестве контактного прибора при измерениях применяли четырехканальный прибор ПИФ-2 [3], работающий в интервалах: первый канал – 400–670 нм; второй – 670–710 нм; третий – 710–1100 нм и четвертый – 1100–1700 нм. Контактный прибор ПИФ-2 был разработан в 1996 году, использовался для работ в области экологии и имеет геометрию измерения $D/0^\circ$ (диффузное освещение и наблюдение по нормали к измеряемой поверхности). Для освещения образцов в приборе применена полусфера с шестью лампами накаливания, работающими в импульсном режиме. Последнее позволило избавиться от внешних засветок и устранить сползание нулевого отсчета. Диаметр пятна на образце составляет 15 мм. Спектральные интервалы выделяются светофильтрами. Обработка сигналов ведется микропроцессорным устройством, которое позволяет запоминать до 500 отсчетов, считать среднее значение и среднеквадратическое отклонение (СКО) из 2–32 отсчетов и выводить данные измерений на компьютер и независимо от компьютера – на стандартный принтер. Разброс показаний прибора по эталону не превышает $\pm 0,2\%$ из 10–12 измерений, что позволяло не учитывать этот разброс в измерениях. Вес прибора ПИФ-2 (рис. 2) вместе с источником питания около 2 кг. Прибор использовался в измерениях 2010 года, в 2011 году вместо него применяли упрощенный и более дешевый вариант этого прибора – двухканальный активный контактный тестер АКТ (рис. 2) В нем в качестве источников излучения использовали светодиоды с длинами волн излучения 530 нм и 910 нм. Геометрия измерения – $8^\circ/D$

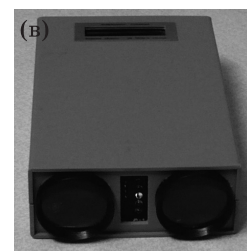
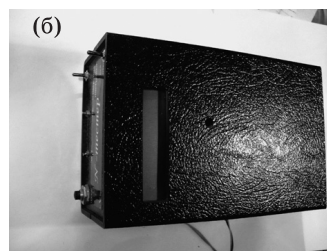


Рис. 2. Внешний вид приборов ПИФ-2 (а), АКТ (б) и АДТ (в).

(рис. 3). Диаметр пятна на образце составляет также 15 мм. Прибор имеет меньшие габариты и вес менее 1 кг. Результаты измерения выводятся на цифровое табло и могут передаваться в компьютер, на который возлагается функция подсчета средних значений и среднеквадратичных отклонений.

Проведение измерений

В работе ставилась задача провести сравнительные испытания перечисленных приборов на различных растениях в разных погодных условиях и в течение всего периода роста растений летом 2010, 2011 годов. Цель работы – выявить наиболее информативные параметры и условия

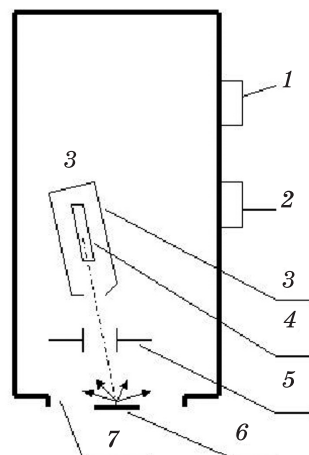


Рис. 3. Оптическая схема прибора АКТ: 1, 2 – фотоприемники со светофильтрами, 3 – экран, 4 – светодиод с тубусом, 5 – диафрагма, 6 – измеряемый образец, 7 – входное окно.

Таблица 1. Погодные условия при измерении

№ п/п	2010 г.	Час	Погода	2011 г.	Час	Погода
1	18.07	14	Солнце	27.06	20	После дождя
2	22.07	21	Солнце, 27° С	08.07	20	Солнце, 20° С
3	24.07	14	После дождя	13.07	18	Солнце, 20° С
4	28.07	22	Солнце, 25° С	24.07	10	Солнце, 20° С
5	03.08	21	Солнце	27.07	18	Пасмурно
6	07.08	14	Солнце, 34° С	07.08	15	Дождь, 20° С
7	10.08	23	После дождя	14.08	19	После дождя, 20° С
8	14.08	19	Солнце	17.08	20	Без солнца, 18° С
9	15.08	14	Пасмурно, 25° С	21.08	11	Солнце
10	18.08	14	После дождя	28.08	10	После дождя
11	21.08	14	Пасмурно, 20° С	13.08	15	Солнце
12	25.08	19	Дождь	15.09	20	После дождя
13	28.08	13	Солнце, 14° С	17.09	20	Солнце
14	01.09	11	Солнце, 11° С	27.09	20	Пасмурно
15	25.09	17	Солнце, 18° С	01.10	15	Пасмурно

измерений для дальнейшей модернизации разрабатываемых приборов сельскохозяйственного назначения. В качестве объектов измерения использовали растения приусадебного участка, как однолетние, так и постоянно растущие. К первым относятся картофель, бобы, огурцы; ко вторым – травы осот и сныть, лиана актинидия, имеющая крупные листья, зеленые в течение всего лета, и ель. Почва была песчаной. Наиболее полные измерения были сделаны для картофеля, сныти и актинидии. Остальные растения дополняли общую картину.

Измерения проводили в разное время суток, в солнечную и пасмурную погоду, а также под дождем. Лето 2010 года было очень удачным для таких экспериментов. В середине лета стояла сильная жара в течение трех недель, которая сменилась периодом сильных дождей. Растения при этом испытывали стресс, что позволило испытать приборы и в таких условиях (табл. 1). В таблице приведены даты измерений, время суток и основные погодные условия, такие как температура, солнце, дождь. В первой графе приведены номера измерений отдельно для лета 2010 и 2011 годов. Эти номера в дальнейшем приведены на всех графиках по оси X. Это позволяет по табл. 1 определить условия измерений в каждой точке на графиках. Испытания проводили в течение второй половины лета 2010 года. Погода была очень удачной для испытаний. Первая половина лета была умеренно теплая с дождями, что способствовало нормальному росту растений. Поэтому пер-

вые испытания начались на растениях, находящихся в нормальных условиях. Затем в течение трех недель постепенно нарастала жара без дождей (цифры 3–7 на графиках и в табл. 1). Началась засуха. Некоторые растения погибли. В частности бобы полностью засохли и почернели, так и не созрев. Пик жары приходится на точку 7 на графиках. В это время растения испытывали наибольший стресс от недостатка влаги. Затем прошли дожди (точки 8–11) вперемежку с солнечной погодой и условия для роста растений восстановились. В точке 12 измерения проводили под дождем на мокрых растениях. При этом растения испытывали стресс от избытка влаги. Последующие измерения были в благоприятных условиях (точки 13–15 на графиках и в табл. 1). Таким образом, в процессе измерений растения испытывали два явно выраженных стресса противоположного характера – это точки 7 и 12 на графиках. В 2011 году таких резких колебаний погоды не наблюдалось. С точки зрения обеспечения равномерно заполненного поля зрения дистанционного прибора, лучше всего подошли трава сныть, листья лианы актинидии и ель. Сныть имеет широкие листья, равномерно заполняющие поле зрения дистанционного прибора, и не имеет просветов и включений других растений. У нее глубоко сидящие корни, и поэтому она не засыхает в течение всего лета.

Наиболее полные измерения были сделаны для картофеля, сныти и актинидии. Осталь-

ные растения дополняли общую картину. При сравнении результатов измерения отношения спектральных коэффициентов отражения в видимой U_V и ближней ИК областях спектра U_{IR} (рис. 4) видно, что дистанционный прибор слабо реагирует на изменения погодных условий в течение всего периода наблюдения. Контактный прибор, наоборот, показывает сильные изменения указанного отношения в резко изменяющихся погодных условиях, когда растения испытывают стресс. Здесь интересно отметить, что контактный прибор одинаково реагирует, как на изменение показателей растений в засуху (точка 7 на рисунках), так и под дождем (точка 12 на рисунках). Эти изме-

нения четко выражены на всех испытываемых растениях (рис. 5, 6 и 7). Прибор так же четко реагирует на принудительные воздействия на растения. Это хорошо видно на примере полива огурцов (табл. 2). В ней приведены значения отношений спектральных коэффициентов отражения в первом канале прибора ПИФ к третьему (графа 2), второго к третьему (графа 3) и 4 к 3 (графа 4) до полива и примерно через полчаса после полива, когда листья высохли на солнце. Эксперимент проводился несколько раз и характер изменений сохранялся.

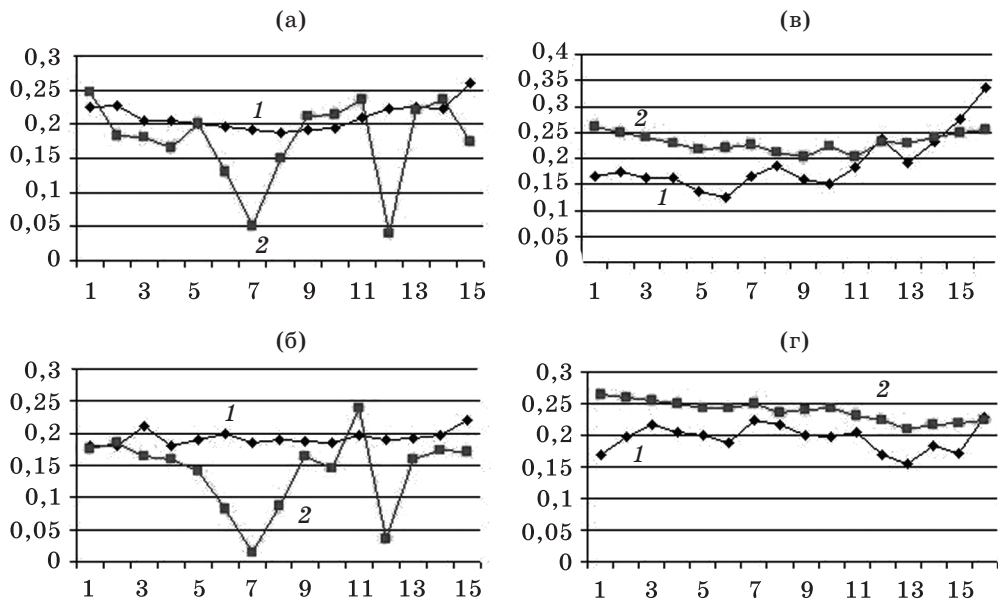


Рис. 4. Сравнительные измерения отношения СпКО в видимой области спектра к инфракрасной области в 2010 г. (а, б) и в 2011 г. (в, г). 1 – дистанционный прибор, 2 – контактный прибор. (а) и (в) – для листьев лианы актинидии, (б) и (г) – для травы сныть.

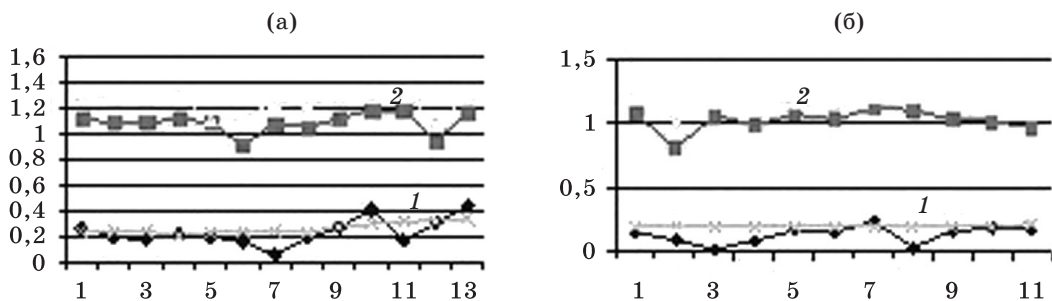


Рис. 5. Сравнительные измерения отношения СпКО. а – трава сныть, б – огурцы. 1 – ПИФ-2 (отношение отсчетов в 1 канале к 3), 2 – ПИФ-2 (отношение отсчетов во 2 канале к 3), 3 – ПИФ-2 (отношение отсчетов в 4 канале к 3), 4 – АДТ.

Таблица 2. Отношение СпКО для огурцов

Отношения в каналах ПИФ-2	1/3	2/3	4/3
До полива	0,175	0,92	1,13
После полива	0,206	1,04	1,22

Зависимость от фазы роста

Для исследуемых растений подсчитаны средние значения отношений U_V к U_{IR} в течение всего лета и отдельно за июль и август 2010 г. для приборов ПИФ и АДТ (табл. 3). При этом для контактного прибора ПИФ были исключены точки, соответствующие стрессу растений. В последней графе таблицы приведено отношение в процентах указанного показателя за август к значению за июль. Из таблицы видно, что отношение U_V к U_{IR} для всех растений зависит от фазы роста растения. Так, для контактного прибора ПИФ для всех исследуемых растений это отношение увеличивается по мере роста растения. В дистанционном приборе АДТ также происходит увеличение этого отношения, но в меньшей степени. В среднем увеличение происходит примерно на 10%. Исключение составили бобы, которые в начале августа почернели и полностью засохли. Следует заметить, что для овощных культур в условиях нормального роста (4 и 6 графы таблицы) это значение больше 0,2, в то время как при стрессах (см. графики на рис. 4, 5 и 7) оно становится менее 0,2. Это может быть универсальным показателем состояния растения. Для дистанционного прибора такая зависимость менее выражена.

Зависимость от других факторов

Измерения проводили утром, днем и вечером. Какой-либо зависимости от времени суток обнаружено не было как для контактного, так и для дистанционного приборов. Не было обнаружено зависимости и от того, освещался ли объект измерения солнцем, или находился в тени. Видимо, это связано с тем, что приборы активные, работают в импульсном режиме и внешняя засветка на них влияет мало. Что касается изменения поведения растений в этих условиях, то эти изменения, видимо, меньше, чем разброс показаний приборов между отдельными растениями. На дожде, как указывалось выше, наблюдается стресс растений, который исчезает по мере высыхания.

Другие спектральные диапазоны

В контактном приборе ПИФ имеются еще два спектральных диапазона: один в области 0,7 мкм возле полосы поглощения хлорофилла, другой в области 1–2 мкм, где присутствуют полосы поглощения воды. СпКО в этих диапазонах в общем повторяет в третьем диапазоне и не дает новой информации по сравнению с отношением в каналах первый-третий (рис. 5). Вычисления соответствующих отношений в каналах первый-второй и первый-четвертый также не дали ничего нового, а наиболее информативным это отношение оказалось в каналах первый-третий. Влияние полос поглощения воды в четвертом канале также незаметно, видимо, из-за того, что спектральный интервал в нем слишком широк.

Таблица 3. СпКО для исследованных растений

Растение	Отношение отсчетов канала 1 к каналу 3, среднее		Отношение отсчетов канала 1 к каналу 3, июль		Отношение отсчетов канала 1 к каналу 3, август		Отношение отсчетов август / июль, %	
	ПИФ	АДТ	ПИФ	АДТ	ПИФ	АДТ	ПИФ	АДТ
Картофель белый	0,236	0,253	0,300	0,262	0,333	0,27	11,1	10,3
Картофель красный	0,246	0,343	0,260	0,347	0,367	0,364	14,1	4,9
Огурцы	0,246	0,275	0,225	0,246	0,336	0,314	14	12,8
Бобы	0,34	0,505	0,25	0,43	0,41	0,58	64	35
Трава	0,14	0,193	0,167	0,190	0,175	0,199	4,8	4,7
Сныть	0,176	0,209	0,203	0,218	0,210	0,222	3,5	1,8
Актинидия	0,267	0,28	0,223	0,243	0,31	0,316	39	1,8

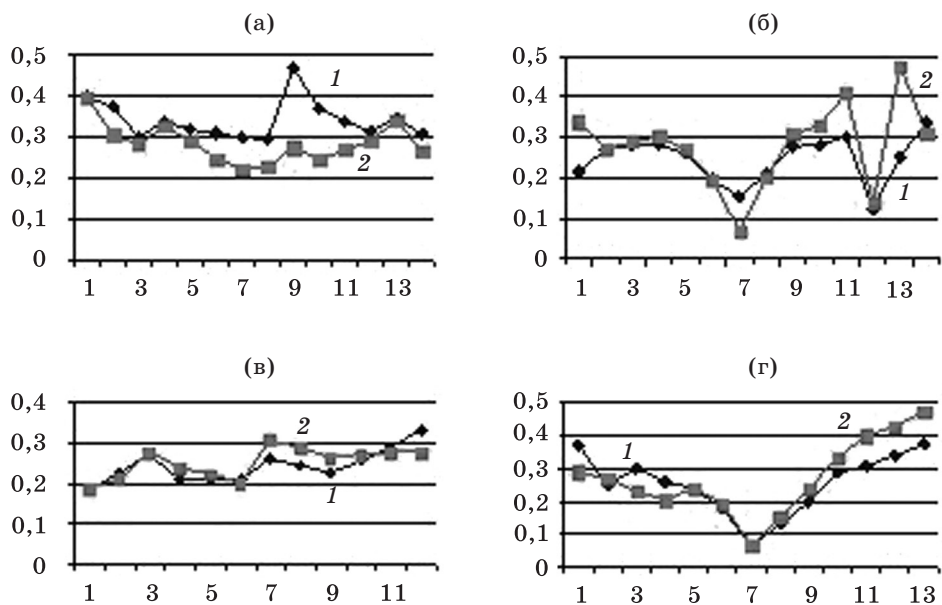


Рис. 6. Отношение СпКо. Картофель красный (а и б) и картофель белый (в и г). (а) и (в) – АДТ, (б) и (г) ПИФ-2, (1 – без удобрения, 2 – с удобрением).

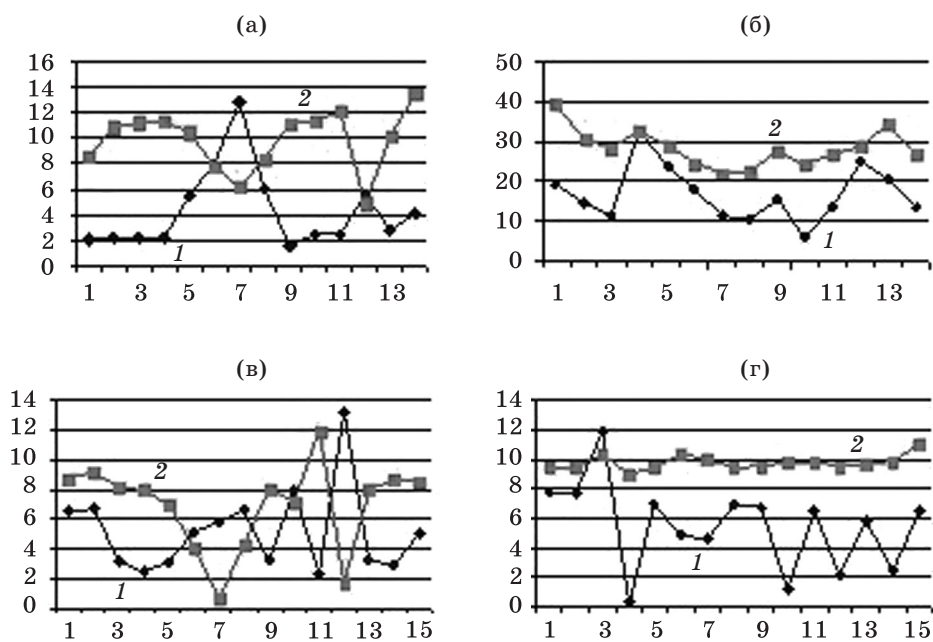


Рис. 7. SKO измерений (1) картофеля красного (а и б) и сныти (в и г). а и в – относятся к контактному прибору ПИФ-2, б и г – к дистанционному АДТ. 2 – отношение U_V/U_{IR} в произвольном масштабе.

Таблица 4. Сравнение результатов измерения разными приборами

Дата измерения, время	АКТ		ПИФ		АДТ	
	U_v/U_{IR}	СКО, %	U_v/U_{IR}	СКО, %	U_v/U_{IR}	СКО, %
06.07.2012(13)	0,264	10	0,185	16	0,183	15
07.07.2012(13)	0,269	19	0,166	18	0,169	13
10.07.2012(13)	0,280	13	0,226	16	0,158	10
19.07.2012(13)	0,296	49	0,169	14	0,162	16

Влияние удобрений

Испытания проводили на картофеле двух сортов, которые условно названы белый и красный. Первый сравнительно хорошо растет на песчаной почве, второй – плохо. При посадке картофеля обоих сортов в почву под половину кустов были внесены минеральные удобрения, под другую половину ничего не вносилось. Количество удобрений строго не нормировалось, но ориентировочно составляло 1,5 под каждый куст. Сравнительные зависимости отношений U_v к U_{IR} для каждого типа картофеля для кустов с удобрениями и без них приведены на рис. 6 в случае контактного и дистанционного приборов. Как видно из рисунков, оба прибора реагируют на внесенные удобрения. Фактически урожай картофеля, полученный со всех 30 кустов картофеля красного без удобрений составил 3,4 кг, с удобрением 4,5 кг. Для картофеля белого урожай с 5 кустов без удобрений 2 кг, с удобрением 2,7 кг. Отсюда видно, что удобрения были эффективны.

Воспроизводимость результатов измерений

В процессе измерений как дистанционным, так и контактным прибором было замечено, что имеется большой разброс показаний приборов от растения к растению. Для дистанционного прибора этот разброс в ряде случаев доходил до 100%, для контактного в несколько раз меньше. При усреднении по 5–15 отсчетам среднее значение более или менее повторялось. Прибор ПИФ автоматически вычисляет СКО результатов измерения от среднего значения. Это позволило построить зависимость СКО для всего цикла измерений от воздействующих факторов. Эти зависимости для разных исследуемых растений получились довольно близ-

кие. На рис. 7 приведена такая зависимость для картофеля и сныти. Здесь же для сравнения приведена зависимость отношения СпКО для первого и третьего каналов прибора ПИФ в измененном масштабе по оси Y. Как видно из рисунка, кривые полностью симметричны. Уменьшению указанного отношения, т.е. стрессу растения, соответствует увеличение СКО. Аналогичные кривые получены и для других растений. Фактически СКО проявляет себя как информативный параметр реакции растения на внешнее воздействие. Аналогичные кривые с небольшими отклонениями получены и для других растений. Также было рассчитано СКО и для дистанционного прибора. Однако здесь таких зависимостей не наблюдалось. В этом случае СКО носит случайный характер и никак не коррелирует с изменением отношения U_v к U_{IR} . Может быть, при большем числе отсчетов и проявится какая-либо зависимость, но для этого нужно проводить специальные опыты.

Сравнение приборов

Если результаты измерения приборов ПИФ и АДТ в 2010 году близки, то показания приборов ПИФ и АКТ в 2011 году довольно сильно отличаются. Поэтому в 2012 году были проведены сравнительные измерения всеми приборами на траве сныть. В табл. 4 приведено отношение СпКО в видимой и ИК-областях спектра U_v/U_{IR} для сныти, измеренное этими приборами. Здесь же приведено СКО результатов из 10–12 измерений разных растений. Измерения проводили днем и вечером в солнечную и дождливую погоду. Как видно из таблицы, результаты измерения всеми приборами днем (13 часов) и поздним вечером (20 часов, 23 часа,) различаются меньше, чем разброс измерений от растения к растению, характеризуемый СКО. Незаметно и существенного изменения в солнечную погоду (даты измерений 06.07, 07.07, 10.07) и в дождь (19.07). Во всех приборах калибровалась 100% шкала, поэтому значительные отклонения в отношениях U_v/U_{IR} разными приборами можно объяснить геометриями измерения в них. При геометрии измерения диффузное освещение – наблюдение по нормали к поверхности измеряемого образца D/0 (прибор ПИФ) для негладких образцов зеркальная составляющая коэффициентов отражения отсутствует в измеряемом сигнале.

В случае небольших коэффициентов отражения удельный вес этой составляющей в сигнале довольно значителен. При геометрии измерения $0/D$ ($12/D$ для прибора АКТ) все косые блики от измеряемого образца суммируются в сигнале, что приводит к существенному увеличению отсчетов. Это наглядно видно при сравнении результатов измерения приборами ПИФ и АКТ. Для проверки был измерен приборами ПИФ и АКТ эталонный образец из диффузно рассеивающего стекла ОНС-2 примерно с таким же коэффициентом отражения. Получилось отношение U_v/U_{IR} для ПИФ – 0,774, а для АКТ – 0,871. Если к показаниям прибора ПИФ добавить зеркальную составляющую коэффициента отражения, которая для полированной поверхности этого стекла равна примерно 4,5%, то указанное отношение увеличится до 0,82. Оставшееся различие в отношениях видимо связано с большим уровнем рассеянного света в простом приборе АКТ и различными спектральными характеристиками каналов приборов.

Выводы и предложения

Контактный и дистанционный приборы слабо реагируют на время суток и солнечную или пасмурную погоду. Контактный прибор с геометрией измерения $D/0^\circ$ резко реагирует на дождь и засуху, при этом реакция на эти воздействия носит одинаковый характер. При абсолютной калибровке по коэффициенту от-

ражения численное значение отношения видимого и инфракрасного каналов характеризует состояние роста растения с учетом поправок на дождь и засуху и хорошо коррелирует с СКО измерений. Спектральные каналы 2 и 4 контактного прибора ПИФ-2 мало информативны. Бесконтактный прибор с геометрией измерения $0^\circ/0^\circ$ имеет большой разброс отсчетов, но средние значения реагируют на недостаток или избыток удобрений. В приборах с зеркальной составляющей коэффициента спектрального отражения в сигнале существенно слабее сказывается влияние погодных условий и стрессов растений на результаты измерения.

По результатам проведенных исследований целесообразно проводить модернизацию приборов по следующим направлениям: Контактный прибор – двухканальный с геометрией измерения $D/0^\circ$. Видимая область и ИК. Передача данных в компьютер. Обработка по специализированной программе. Привязка к местности и времени измерения. Расчет СКО измерений по выбранной серии. Калибровка по эталону отражения. Дистанционный прибор с теми же спектральными каналами. Измерение на частоте повторения для лучшей воспроизводимости. Усреднение по большому числу отсчетов. Привязка к местности и времени измерения. Калибровка по эталону отражения. Для ручного прибора целесообразно использовать геометрию измерения $45^\circ/0^\circ$, в которой отсутствует зеркальная составляющая коэффициента отражения.

* * * * *

ЛИТЕРАТУРА

1. Кувалдин Э.В. Выбор и оптимизация функциональной схемы спектрофотометра коэффициентов диффузного отражения (часть вторая) // Научное приборостроение. 2001. Т. 11. № 2. С. 26–30.
2. Гуревич М.М. Модель солнечного излучения (для энергетических расчетов). Л.: ГОИ им. С.И.Вавилова. 1969.
3. Кувалдин Э.В., Сурин В.Г. Специализированный фотометр для измерения патологических и физиологических изменений в растениях // Оптический журнал. 1998. № 5. С. 43–46.