

УДК: 578.087.1; 575.165; 631.527

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СОВРЕМЕННОГО ТЕПЛОВИДЕНИЯ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ИНФЕКЦИЙ И ОВОДНЕННОСТИ ТКАНЕЙ В СЕЛЕКЦИИ РАСТЕНИЙ НА ЗАСУХОУСТОЙЧИВОСТЬ И УСТОЙЧИВОСТЬ К БОЛЕЗНЯМ

В. П. Нартов¹, В. А. Драгавцев²

¹ ОАО Концерн «Гранит – Электрон», ул. Госпитальная, 3, Санкт-Петербург, 191014

² ГНУ Агрофизический научно-исследовательский институт Россельхозакадемии, Гражданский проспект, 14, Санкт-Петербург, 195220.

E-mail: vpartov@yandex.ru; dravial@mail.ru

Поступила в редакцию 17 сентября 2013 г., принята к печати 26 ноября 2013 г.

В статье продемонстрированы существенные перспективы использования тепловидения для быстрой идентификации ценных индивидуальных генотипов, несущих экономически значимые гены устойчивости к болезням и полигенные системы засухоустойчивости, в расщепляющихся или диких популяциях растений.

Ключевые слова: заболевания растений, диагностика, тепловидение.

ВВЕДЕНИЕ

Ежегодные потери урожая зерновых культур в России от засухи оцениваются в 5–6 млрд. рублей. Примерно такой же экономический ущерб сельскохозяйственному производству РФ наносят болезни и вредители растений. Селекционеры крайне нуждаются в методах и приборах, с помощью которых можно было бы на начальных этапах селекции (в расщепляющихся популяциях, начиная с F₂) достоверно идентифицировать отдельные растения, которые несут экономически ценные гены устойчивости к вредителям и болезням и полигенные системы засухоустойчивости.

В статье рассматриваются перспективы использования тепловизоров для решения задач идентификации ценных индивидуальных генотипов при отборе в расщепляющихся поколениях после гибридизации или в популяциях дикой природы.

Принято называть видимым диапазоном спектр волн 0,4–0,7 мкм, ближним инфракрасным – 0,7–3 мкм и средним инфракрасным – 3–25 мкм. Поскольку интенсивность спектральных распределений в ИК-диапазоне определяют колебания молекул СН, ОН и NH-связей, то содержание сахара, масла, белков, органических кислот и воды в растениях и других средах измеряется с помощью ИК-спектроскопии (Osborne, Fearn, 1986).

Термография применяется в плодоводстве для контроля оптимумов кондиционирования и обтекания воздухом фруктов при хранении (Geyer and others, 2004a и 2004b), контроля охлажденных овощей в хранилищах, классификации потерь продукции из-за разрушения поверхности при очистке овощей, для оценки свежести салата и других овощных комбинаций, выявления отклонений и этапов созревания овощей и фруктов. Возможно также обнаружение с помощью тепловидения микробной инфекции во время гниения персиков (Linke M. and others, 2000, 2001).

ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ДЕРЕВЬЕВ С ПОМОЩЬЮ ТЕРМОГРАФИИ

Необходимость оценки общего состояния деревьев становится все более важной задачей. По мере роста дерева его внутренние структуры нуждаются в постоянном наблюдении, что важно как с точки зрения экологии, так и с точки зрения общественной безопасности. Менеджеры предприятий и местные власти обязаны взвешивать потенциальные риски, связанные с состоянием лесного фонда и культурных насаждений (муниципальных и фермерских садов, парков, скверов, ползащитных лесных полос и защитных полос железных и автомобильных дорог). С помощью термографии задача обследования деревьев становится более простой и экономически оправданной. Традиционные методы получения информации о

здоровье и структуре деревьев требуют большого количества времени. Более того, они далеки от совершенства и зачастую являются инвазивными. Принимая во внимание данное обстоятельство, вновь созданная при университете Ноттингем Трент компания Tree Project Limited разработала высокоэффективную и надежную систему оценки состояния деревьев, не причиняющую им никакого вреда. Данная система существенно экономит время и средства клиентов. В основе ее лежит термография от компании FLIR. Основатель компании доктор Маркус Беллет-Треверс поясняет: «Технология идеально подходит в качестве неинвазивного метода, она позволяет отличить друг от друга здоровые и поврежденные слои древесины (рис. 1). Она также от 100 до 1000 раз

более эффективна, нежели другие технологии, особенно в части оперативного предоставления необходимой информации. Поскольку это высокоскоростная технология, она является и высокоэффективной». Далее он продолжает: «Мы можем предоставить детальную информацию о состоянии стволов и веток, обследуя до 100 деревьев в течение одного дня. И если мы обнаруживаем часть дерева, представляющую для нас интерес, например, базальные отложения на стволе (подобные дефекты могут встречаться на нескольких сотнях деревьев), мы очень быстро диагностируем их природу. Кроме того, нет необходимости в процессе измерений влезать на деревья и отламывать куски коры со ствола».

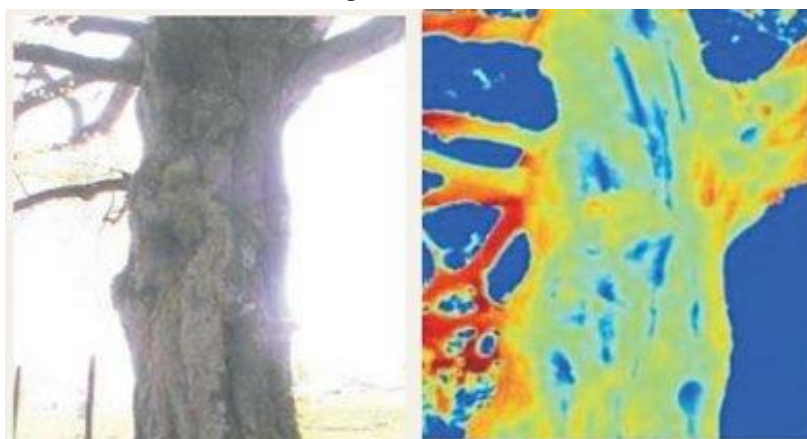


Рис. 1. Термограмма бука с разрушениями в центре ствола (синие зоны), а также живыми ветками (красные зоны).

РАСПОЗНАВАНИЕ ПОВРЕЖДЕНИЙ И ЗАБОЛЕВАНИЙ ВНУТРИ СТВОЛА ДЕРЕВА

Деревья продуцируют очень небольшую энергию по сравнению с живыми существами. Это означает, что тепловая энергия, выделяемая с поверхности ствола, первоначально была потреблена им из окружающей среды. Здоровое дерево обладает хорошей проводимостью, и его клетки достаточно снабжаются водой. Это отчетливо видно на термограмме, сделанной тепловизором FLIR. Если нормальное функционирование дерева нарушено вследствие физического дефекта или воздействия патогенов, на термограмме четко обозначатся более холодные зоны. Чем больше холодных зон внутри ствола, тем выразительнее их температурный эффект на поверхности.

ПОДХОДЫ К ВЫЯВЛЕНИЮ ЗДОРОВЫХ И ИНФИЦИРОВАННЫХ РАСТЕНИЙ

Для выявления растений со стрессами и инфекциями, нарушающими функции хлоропластов, может использоваться флуоресценция хлорофилла, если их нельзя определить визуально (Daley, 1995; Herppich, 2002).

Если стрессы или инфекции (микробные инфекции, питательные стрессы, инвазии насекомых, действие засухи) приводят к изменению поверхностной температуры из-за воздействия на процессы обмена, то соответствующие растения могут быть обнаружены термографией (Inoue, 1990; Nilsson, 1995; Hellebrand и др., 2004).

Существуют многочисленные публикации, в которых рассматривается применение видимого и ближнего ИК диапазонов

для выявления растительных инфекций (Amon and Schneider, 1993; Brown et al., 1994; Woebbecke et al., 1995b).

ВОЗМОЖНОСТЬ РАЗДЕЛЕНИЯ ЗДОРОВЫХ И ИНФИЦИРОВАННЫХ РАСТЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ ДОСТУПНЫХ ПО ЦЕНЕ КАМЕР БЛИЖНЕГО И СРЕДНЕГО ИК ДИАПАЗОНОВ

Заражение грибами и другими микроорганизмами ведет к усыханию растения в результате нарушения работы его ферментов при формировании мицелия. Спектральные полосы поглощения воды находятся в нижнем ИК диапазоне (рис. 2).

Таким образом, для получения инфракрасного изображения здоровых и пораженных растений следует применять камеры нижнего ИК диапазона с установленными полосовыми фильтрами с диапазоном поглощения воды (около 1,4 мкм).

Однако из-за небольших различий в спектрах выявление зараженных ржавчиной больших площадей растений не может быть эффективным. Увеличивает шансы дифференциации применение соотношения интенсивностей в разных полосах. Здоровые листья растений показывают отношение интенсивности на полосах (1070–1100 нм) и

(1435–1465 нм), равное 5,78 (выборка 240, дисперсия = 0,35), а инфицированные ржавчиной – равное 4,68 (выборка 240, дисперсия = 0,83).

Итак, ржавчину (различие в температуре между здоровыми и инфицированными растениями было почти всегда ниже 0,1 градуса) можно определить только с помощью камеры ближнего ИК диапазона с выделением полос, похожей на фотоаппарат с ИК фильтром.

Мучнистая роса индуцирует более существенные температурные отклонения. Температура листьев растений уменьшается, когда мучнистую росу (ее мицелий) можно определить визуально, а через несколько дней температура инфицированных частей растений становится на 0,2–0,9 градуса ниже, чем у здоровых растений (рис. 3). Снимок сделан тепловизором в среднем ИК диапазоне.

Однако иногда распределение температуры по всей листе различается по ходу развития инфекции. Температура поздно выросших листьев инфицированного растения, которые выглядят здоровыми, достигает более высоких значений по сравнению со здоровыми растениями (рис. 4). Это первая проблема.

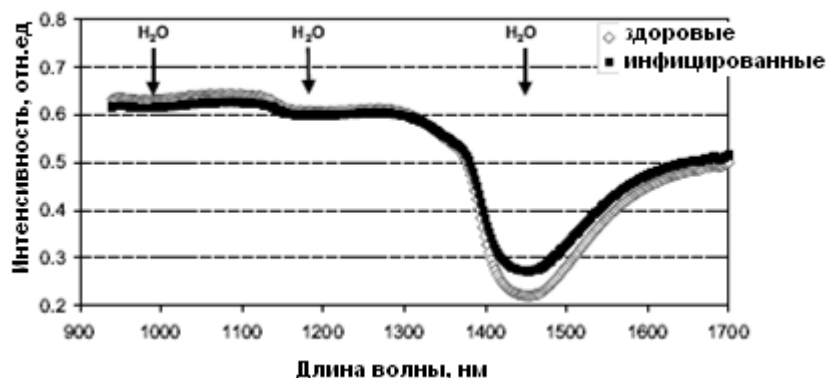


Рис. 2. Осреднённый ближний ИК спектр здоровых и инфицированных ржавчиной растений пшеницы

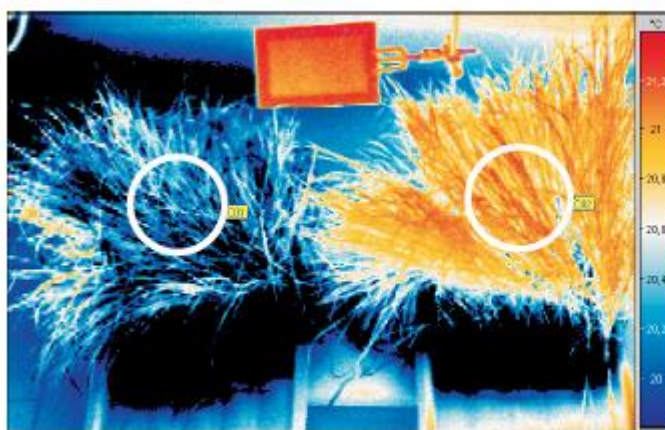


Рис. 3. Термограммы растений пшеницы (при $T = 22,5^{\circ}\text{C}$, RH 47%): растения, зараженные мучнистой росой (слева), и здоровые растения (справа)



Рис. 4. Видимое (левая картинка) и инфракрасное (правая картинка) изображения растений пшеницы. Левые сосуды на обеих картинках – растения инфицированы мучнистой росой, правые сосуды на обеих картинках – здоровые растения

Вторая проблема заключается в дистанционном использовании метода в поле. Полевые испытания свидетельствуют, что получить информацию, предназначенную для защиты растений, простой оценкой средних значений температуры, минимумов, максимумов и стандартных отклонений практически невозможно из-за естественных колебаний температуры в несколько градусов в растительном покрове. Естественных вариаций температуры значительно больше, чем инфекционных эффектов. Поэтому информация, предназначенная для защиты растений в масштабах поля, не может быть получена из теплового изображения коммерческого тепловизора 320×240 пикселей, установленного на тракторе в сотне шагов от поля с пшеницей. Только оценка отдельных растений дает возможность обнаружить инфекцию, вызывающую сдвиг температуры. Вопрос о том, можно ли с помощью сочетания тепловизора (средний ИК диапазон) со зрительным и нижним ИК диапазо-

нами или с флуорографом получить эффективную дистанционную оценку, пока остается без ответа.

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕПЛОВИЗОРОВ НА РАННИХ ЭТАПАХ СЕЛЕКЦИИ

В селекции растений на устойчивость к вредителям и болезням используется индивидуальный отбор растений по фенотипам в расщепляющихся популяциях второго поколения – F_2 (и последующих поколений). Визуальный отбор очень неточен (с его помощью трудно определить, заражено ли растение на первых этапах развития или нет). Поскольку существуют разные гены устойчивости (для ранних фаз развития растений и для поздних), то поиск экономически эффективных генов надо вести по фазам развития растений, когда визуально селекционер еще не обнаруживает инфекции. В решении указанных задач существенную помощь может оказать тепловидение.

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕПЛОВИЗОРОВ В СЕЛЕКЦИИ НА ЗАСУХОУСТОЙЧИВОСТЬ

Возможность определить степень оводненности индивидуального растения в селекционном процессе по отклонениям его температуры на пестром (по содержанию влаги в почве) питомнике отбора открывает важную перспективу для точной идентификации засухоустойчивых индивидуальных генотипов, которые в сухой микронше дают такой же фенотип, как незасухоустойчивые растения во влажной микронше. Визуально селекционер не может оценить генетические различия указанных растений, поэтому эффективность подобных традиционных отборов на засухоустойчивость (что было продемонстрировано П. П. Литунум) очень низка – из 10000 отобранных по фенотипу растений на фоне засухи только одно оказывается генетически засухоустойчивым (Михайленко, Драгавцев, 2013). В качестве фоновых признаков, которые не имеют генетической изменчивости и поэтому «пишут» на себе только вариабельность микроусловий роста отдельных растений, ранее были изучены оводненность листовой паренхимы, рефрактометрический индекс клеточного сока и импеданс (Драгавцев, 1983). В итоге были получены хорошие результаты, но на каждый индивидуальный замер затрачивалось от 10 до 30 минут. Использование тепловизора позволит сократить время замера и повысить точность оценки каждого растения при отборах в расщепляющихся популяциях.

ПЕРСПЕКТИВЫ ТЕПЛОВИДЕНИЯ ЛЕСНОЙ СЕЛЕКЦИИ НА УВЕЛИЧЕНИЕ СКОРОСТИ РОСТА

Использование тепловизоров имеет большие перспективы в лесной селекции при решении задач разграничения генетических и средовых вкладов в приросты так называемых «плюсовых» (самых быстрорастущих) деревьев. Ситуации могут быть различными. Одно «плюсовое» дерево, произрастая в средней микронше, отличается быстрым ростом за счет генов его скорости, другое, произрастая во влажной микронше, имеет большие приросты за счет комфортных условий обитания. Сегодня для точного установления истинных причин быстрого роста деревьев надо собрать с каждого из них семена, высеять их на делянках и ждать 20 лет, чтобы по средним величинам высоты потомства установить генетически

ценное материнское дерево. Быстрая идентификация генетически ценных (реальных «плюсовых») деревьев резко повысит эффективность лесной селекции, причем почти без дополнительных затрат: так называемые «плюсовые» деревья без ценных генов быстро роста будут убираться в процессе плановых рубок ухода (небольшие затраты пойдут только на приобретение тепловизоров и на быстрый поиск деревьев-носителей ценных генов скорости роста, которые будут оставлены в лесу).

ВЫВОДЫ

1. В лабораторных исследованиях и в поле на отдельных растениях термография может выявить грибковые инфекции растений, поскольку нижний ИК диапазон тепловидения способен визуализировать водные сдвиги в поверхностных тканях растений. Для усиления контрастности различий немецкие авторы рекомендуют широкополосное ближнее ИК изображение фильтровать по полосам пропускания, делить и частное предлагать к визуализации. Возможно, говоря о необходимости более чем двух полос плюс видимый диапазон, немецкие ученые допускают небольшую неточность. Задача соотношения энергии по полосам не уникальна, она используется для прицелов ночного видения.

2. Дистанционное применение тепловизоров для защиты растений ограничено из-за естественных колебаний температуры и влажности внутри делянок и по полю. Однако в селекции на устойчивость к болезням и вредителям, когда используется только индивидуальный отбор, портативные дешевые тепловизоры могут существенно повысить эффективность отборов и создания новых иммунных сортов. Использование тепловизоров перспективно и в лесной селекции на иммунитет для быстрой идентификации деревьев-носителей ценных генов устойчивости к болезням.

3. При селекции на засухоустойчивость (отбор индивидуальных растений в расщепляющихся популяциях или в дикой природе) портативные тепловизоры могут быть очень полезны, т.к. они в принципе способны отличить засухоустойчивое растение, растущее на сухом бугорке в питомнике отбора, от незасухоустойчивого растения, произрастающего во влажной ямке, при абсолютно одинаковых фенотипах данных растений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Драгавцев В. А. 1983. Генетика количественных признаков растений в решении селекционных задач. Диссертация доктора биологических наук, 03.00.15 – генетика. ИОГен АН СССР. С. 124–129.
- Драгавцев В. А. 2008. Основы будущих наукоёмких селекционных технологий для генетического улучшения полигенных экономически важных свойств растений // *Аграрная Россия*. 4:2-10.
- Михайленко И. М., Драгавцев В. А. 2013. Математические модели в селекции растений. Сообщение II. Алгоритмы управления генетико-селекционным улучшением хозяйственно-ценных свойств самоопылителей // *Сельскохозяйственная биология*. 1:35-41.
- Amon H., Schneide T. 1993. Anwendung spektraler Signaturen von Pflanzenbeständen für die Produktionstechnik im Pflanzenbau // *Zeitschrift für Agrarinformatik*. 3:54-60.
- Daley P. F. 1995. Chlorophyll fluorescence analysis and imaging in plant stress and disease // *Can. J. Plant Pathology*. 17:167-173.
- Geyer S., Gottschalk K., Hellebrand H. J., Schlauderer R., Beuch E. H. 2004a. Infrarot-Thermografie zur Klimasteuerung in einem Großkisten-Kartoffellager // *Landtechnik*. 59 (2):96-97.
- Geyer S., Gottschalk K., Hellebrand H. J., Schlauderer R. 2004. Application of thermal imaging measuring system of thermal imaging measuring system to optimize the climate control of potato stores // *AgEng Conf. Engineering the Future, Leuven, Belgium, 12–16.09. 2004. Book of Abstracts. Part 2. P. 1066–1067.*
- Hellebrand H. J., Beuche H., Dammer K. H., Flath K. 2004. Plant evaluation by NIR-imaging and thermal imaging // *AgEng. Conf. Engineering the Future, Leuven, Belgium, 12.09. 2004. Book of Abstracts. Part 2. P. 946–947.*
- Herppich W. B. 2002. Chlorophyllfluoreszenzbildanalyse und Fluoreszenzspektralanalyse // *Landtechnik*. 57 (2):98-99.
- Inoue Y. 1990. Remote detection of physiological depression in crop plants with infrared thermal imagery // *Japanese J. Crop Sci.* 59 (4):762-768.
- Linke M., Beuche H., Geyer M., Hellebrand H. J. 2000. Possibilities and limits of the use of thermography for the examination of horticultural products // *Agrartechnische Forschung*. 6 (6):110-114.
- Linke M., Herold B., Hellebrand H. J. 2001. Thermographic studies of horticultural products // *ASTEQ Final Plenary Meeting, Paris, 2001, 21–23 March.*
- Nilsson H. E. 1995. Remote sensing and image analysis in plant pathology // *Can. J. Plant Pathology*. 17:154-166.
- Osborn B. G., Fearn T. 1986. Near Infrared Spectroscopy in Food Analysis // *Longman Scientific and Technical*. Harlow, Essex.
- Woebbecke D. M., Meyer G. E., Von Bargen K., Mortensen D. A. 1995. Shape features for identifying young weeds using image analysis // *Transactions of the ASAE*. 38 (1):271-291.



**ВЫШЛИ ИЗ ПЕЧАТИ ПУБЛИКАЦИИ СОТРУДНИКОВ
АГРОФИЗИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА:**

Ананьев И. П. Двухкомпонентная диэлькометрия сельскохозяйственных материалов. Автогенераторные и измерительные преобразователи. *Palmarium Academic Publishing, Saarbrücken*. 2012. 311 с.

Моисеев К. Г. Мониторинг агрофизических свойств пахотных почв Северо-запада России. Методические рекомендации. *Palmarium Academic Publishing, Saarbrücken* 2012. 84 с.

Buchkina N. P., Rizhiya E. Y., Pavlik S. V., Balashov E. V. 2013. Soil Physical Properties and Nitrous Oxide Emission from Agricultural Soils. In: S. Grundas (Ed.) *Advances in Agrophysical Research*. InTech, Shanghai, p. 193–220.
