УДК 634.11:004.54

# АВТОМАТИЗАЦИЯ ОЦЕНИВАНИЯ СТЕПЕНИ ПОВРЕЖДЕНИЯ ТКАНЕЙ И ПОЧЕК СОРТОВ ЯБЛОНИ ПРИ ИСКУССТВЕННОМ ПРОМОРАЖИВАНИИ

**А.И. Бутенко, Н.И. Савельев, А.Н. Юшков, Н.В. Жукова**

*ФГОУ ВПО «Мичуринский государственный аграрный университет»; Всероссийский научно-исследовательский институт генетики и селекции плодовых растений им. И.В. Мичурина, г. Мичуринск*

*Рецензент А.И. Завражнов*

**Ключевые слова и фразы:** индекс согласованности; матрица парных сравнений; морозостойкость; относительная согласованность; промораживание; степень повреждения.

**Аннотация:** Степень повреждения тканей и почек шести сортов яблони были оценены двумя способами: с помощью специальной компьютерной программы и визуальным осмотром. Компьютерная оценка производилась по предварительно сканированным срезам. Результаты, полученные обоими методами, оказались согласованными.

Одним из методов оценки степени повреждения черенков при искусственном промораживании является анатомический метод, который основан на изменении окраски тканей. Анатомическая оценка делается глазомерно на срезах черенков и почек и оценивается в баллах. При этом оценки, сделанные разными исследователями, могут различаться. Для автоматизации анатомической оценки была составлена компьютерная программа, которая позволяет оценить степень повреждения по сканированным срезам черенков и почек.

В программе происходит распознавание следующих структур поперечного среза черенка: 1) фон; 2) кора (эпидерма); 3) флоэма; 4) древесина; 5) сердцевина. Для последних трех структур (тканей) оценивается здоровая и поврежденная части. Получается восемь различных структур, каждая из которых в файле распознавания окрашивается в свой цвет. Каче-

Бутенко А.И. – доктор сельскохозяйственных наук, профессор, заведующий кафедрой математики и физики МичГАУ; Савельев Н.И. – доктор сельскохозяйственных наук, академик РАСХН, директор ВНИИГиСПР им. И.В. Мичурина; Юшков А.Н. – кандидат сельскохозяйственных наук, заместитель директора ВНИИГиСПР им. И.В. Мичурина; Жукова Н.В. – старший преподаватель МичГАУ, г. Мичуринск.

ство распознавания можно оценить визуально, сравнивая изображение среза и изображение, полученное при распознавании. Встроенный графический редактор позволяет подправить ошибки в распознавании. После распознавания оценивается степень повреждения. Чтобы понять, как получается такая оценка, нужно сделать небольшое пояснение того, как производится цифровая обработка изображения на компьютере.

На цветном мониторе компьютера изображение строится из точек (пикселей). Каждый пиксель характеризуется своими координатами и цветом. Все наблюдаемое многообразие красок составляется из трех основных цветов: красного, зеленого и голубого. Различная интенсивность каждого из этих цветов позволяет окрашивать пиксель практически в любой воспринимаемый глазом цвет. Таким образом, цвет каждого пикселя определяется тремя числами – интенсивностями окраски соответственно красного, зеленого и голубого цветов. Каждая из этих интенсивностей может принимать значения от 0 до 255. Такое устройство, как сканер, позволяет любое закладываемое в него изображение, в том числе и срез черенка растения, закодировать и записать в виде графического файла в память компьютера. Там оно будет храниться, как массив чисел.

Пусть, например, некоторый $i$-й пиксель на первом этапе работы программы распознан, как поврежденный файл флоэмы. Обозначим через $r_i$, $g_i$, $b_i$ – интенсивности окраски соответственно красного, зеленого и голубого цветов для этого пикселя. Интенсивности окраски здоровой ткани для такой флоэмы пусть будут $r_o$, $g_o$, $b_o$. Тогда чем больше различается первая тройка чисел от второй, тем больше будет степень повреждения пикселя, поэтому естественно оценивать эту степень евклидовым расстоянием между двумя точками

$$d_i = \frac{1}{d_{\max}} \sqrt{(r_i - r_o)^2 + (g_i - g_o)^2 + (b_i - b_o)^2}\,, \qquad (1)$$

где $d_{\max}$ – нормирующий множитель, благодаря которому $d_i \le 1$. Величины $d_{\max}$, $r_o$, $g_o$, $b_o$ были определены для каждой из структур из опытных данных на предварительном этапе исследования. Если количества поврежденных и здоровых пикселей во флоэме данного среза обозначить соответственно $n$ и $m$, то степень повреждения флоэмы данного среза будет

$$k = \frac{d}{n+m}\,, \qquad (2)$$

где $d = \sum_{i=1}^{n} d_i \le n$.

В знаменателе формулы (2) стоит площадь всей флоэмы. Обычно показатель $k < 1$ и он будет равен единице, когда все пиксели флоэмы будут повреждены в максимальной степени. Для получения обобщенного показателя повреждения флоэмы у группы срезов одного сорта нужно просуммировать по этой группе показатели $n$, $m$, $d$. Если обозначить через $N$, $M$, $D$ полученные суммарные значения, то в качестве обобщенной оценки группы срезов можно взять

$$K = \frac{D}{N+M}\,. \qquad (3)$$

Такие оценки получаем также для других структур – древесины и сердцевины. Ткани среза почки отличаются по строению и по функциональному назначению от тканей среза побега, но и здесь программа выделяет три зоны (структуры): приграничную зону, примыкающую к покровным чешуйкам почки, среднюю зону и центральную зону с зачатками цветков.

При обработке изображение каждого среза записывается в отдельный файл, а результаты сохраняются в текстовом файле в виде таблицы. Строки соответствуют обрабатываемым файлам. В первом столбце стоит наименование (среза) файла, в последующих девяти столбцах – показатели $m$, $n$, $k$ для каждой из трех структур.

Для того чтобы выяснить на сколько согласуются оценки, полученные с помощью компьютера, с визуальными оценками, были проморожены при –40 °С в середине зимовки и оценены обоими способами черенки контрастных по морозостойкости сортов яблони: Антоновка обыкновенная, Богатырь, Жигулевское, Коричное полосатое, Мельба, Ренет Черненко.

Вначале на предварительном этапе необходимо было найти значения параметров $d_{max}$, $r_o$, $g_o$, $b_o$ для каждой структуры. Для этого программа обработки изображений срезов была приспособлена к определению средних значений интенсивностей здоровой части и интенсивностей наиболее поврежденных пикселей каждой из структур. Эту обработку мы провели по всем сканированным файлам срезов черенков всех сортов. Полученные показатели $d_{max}$, $r_o$, $g_o$, $b_o$ представлены в табл. 1.

После этого стало возможным с использованием формул (1) – (3) оценить степени повреждения каждого среза и каждого сорта, для чего компьютерная программа была соответствующим образом переделана. Затем все срезы вновь были обработаны, и получены оценки степени повреждения каждой структуры каждого среза. В табл. 2 даны значения показателя $K$ для каждой структуры и для каждого из изучавшихся сортов. В приведенной табл. 2 данные нормированы так, что сумма каждого столбца равна единице.

Чтобы получить обобщенную оценку по каждому сорту, нужно элементы каждой строки табл. 2 умножить на некоторые веса и сложить. Мы находили такие веса из условия, чтобы рассчитанные оценки были близки к оценкам, полученным визуально. При визуальном методе обычно производят оценку по следующим тканям среза: коре, камбию, сердцевинным лучам, древесине, перимедуллярной зоне и сердцевине [1–3]. При компьютерном распознавании не удалось соблюсти полностью такое разделение. Так, из-за незначительных по сравнению с фоном различий в окраске здоровой и поврежденной эпидермы, ее оценка не производилась.

Таблица 1

**Параметры для оценки степени повреждения разных структур**

| Структура | $r_o$ | $g_o$ | $b_o$ | $d_{max}$ |
|---|---|---|---|---|
| Флоэма | 180 | 180 | 125 | 162,56 |
| Древесина | 200 | 200 | 150 | 216,00 |
| Сердцевина | 230 | 220 | 180 | 238,54 |

Таблица 2

**Степени повреждения разных структур**

| Сорт | Структура | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Побег | | | Почка | | |
| | Флоэма | Древесина | Сердцевина | Пригранич. | Средн. | Центральн. |
| Антоновка обыкновенная | 0,119 | 0,150 | 0,139 | 0,139 | 0,106 | 0,125 |
| Богатырь | 0,200 | 0,178 | 0,221 | 0,186 | 0,202 | 0,150 |
| Жигулевское | 0,294 | 0,223 | 0,057 | 0,196 | 0,229 | 0,214 |
| Коричное полосатое | 0,057 | 0,090 | 0,189 | 0,166 | 0,158 | 0,168 |
| Мельба | 0,158 | 0,157 | 0,243 | 0,163 | 0,162 | 0,164 |
| Ренет Черненко | 0,172 | 0,202 | 0,152 | 0,151 | 0,143 | 0,180 |

Камбий располагается в виде узкой полоски между флоэмой и древесиной, и на изображениях распознаются лишь отдельные изолированные участки. Эти участки мы включаем во флоэму. Чтобы сопоставить компьютерную оценку с визуальной, мы рассмотрели четыре обобщенные зоны: кору, камбий, древесину и сердцевину. При этом корой обозначали не только эпидерму, но и всю флоэму, включая сердцевинные лучи. Перимедуллярная зона включалась в древесину. Таким образом, под древесиной и сердцевиной понимаются одни и те же структуры в обоих подходах, а флоэма частично совпадает с корой и камбием, но не включает эпидерму. Для почки визуально делали одну балльную оценку, не выделяя разных зон. Все различия в разделении на зоны между рассматриваемыми подходами мы попытались компенсировать подходящим выбором весов, с которыми входит оценка каждой структуры в общую оценку.

При визуальной оценке просматривали все срезы и оценивали в баллах степень повреждения каждой структуры. Для получения интегральной оценки сортов мы использовали метод парных сравнений Саати [4] и его дальнейшее развитие – метод анализа иерархий [5]. Применительно к рассматриваемому случаю суть метода заключается в следующем. По каждой структуре составляется матрица парных сравнений. Ее диагональные элементы $a_{ii}$ равны единице. Сравниваем суммы баллов у каждой пары сортов (если у сортов разное количество повторностей, то можно взять одинаковое их число). Если, например, у $i$-го и $j$-го сортов суммы примерно одинаковы, то полагаем $a_{ij} = a_{ji} = 1$. Если сумма баллов $i$-го сорта больше суммы баллов $j$-го сорта, то записываем $a_{ij} = 3$, а $a_{ji} = 1/3$. Если же превышение суммы значительное, то полагаем $a_{ij} = 5$ и $a_{ji} = 1/5$. Если не можем сделать различия между оценками 1 и 3 или 3 и 5, то ставим соответственно 2 и 4 (симметричные элементы, тогда будут соответственно равны 1/2 и 1/4). В табл. 3 в первых 6 столбцах и строках представлена матрица парных сравнений для оценки степени повреждения коры.

Полученные данные представляют собой матрицу (обозначим ее через $A$) размера $6 \times 6$. Ее элементы $a_{ij}$ должны удовлетворять соотношениям $a_{ii} = 1$; $a_{ij} = 1/a_{ji}$. Такие матрицы называются обратносимметричными. На-

Таблица 3

**Матрица парных сравнений сортов по повреждению коры**

| Признак | Сорт | | | | | | Вектор *v* приоритетов |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | |
| Антоновка обыкновенная | 1 | 1/4 | 1/5 | 1/3 | 1/4 | 1/4 | 0,0434 |
| Богатырь | 4 | 1 | 1/3 | 3 | 1 | 1 | 0,1634 |
| Жигулевское | 5 | 3 | 1 | 5 | 3 | 3 | 0,3946 |
| Коричное полосатое | 3 | 1/3 | 1/5 | 1 | 1/3 | 1/3 | 0,0718 |
| Мельба | 4 | 1 | 1/3 | 3 | 1 | 1 | 0,1634 |
| Ренет Черненко | 4 | 1 | 1/3 | 3 | 1 | 1 | 0,1634 |

Примечание. $\lambda_{max}$ = 6,188; ИС = 0,375; ОС = 0,030.

ходим собственный вектор *v* этой матрицы, соответствующий наибольшему собственному значению λ, то есть вектор, удовлетворяющий уравнению $Av = \lambda v$. Элементы вектора *v* (вектора приоритетов) будут упорядочивать сорта. Находили *v* и λ в системе Matlab. Собственные векторы определяются с точностью до постоянного множителя. В последнем столбце табл. 3 приведен вектор *v*, нормированный так, что сумма его компонент равна единице. Этому вектору соответствует максимальное собственное значение $\lambda_{max}$ = 6,416. По нему определяется индекс согласованности ИС = $(\lambda_{max} - n)/(n - 1)$, где *n* – число сравниваемых элементов (в нашем случае 6). Если разделить ИС на число, соответствующее случайной согласованности матрицы того же порядка, получаем относительную согласованность (**ОС**). Случайная согласованность получается при случайном выборе элементов обратносимметричной матрицы из шкалы 1/9, 1/8,…,1, 2,…,9. В работе [5] приведены случайные согласованности для матриц разного порядка. Для *n* = 6 эта величина равна 1,24. Как указывается в отмеченной работе, величина ОС должна быть порядка 10 % или менее (в нашем случае она равна 3 %). В некоторых случаях можно допустить 20 %, но не более. Если ОС выходит из этих пределов, оценки в матрице парных сравнений считаются несогласованными между собой и их следует пересмотреть.

В табл. 4 приведены векторы приоритетов для разных структур. Оценки срезов для коры и камбия очень мало различались, поэтому соответствующие матрицы парных сравнений и векторы приоритетов для этих двух структур совпали.

Для получения общей оценки степени повреждения сорта нужно учитывать физиологическую неравноценность структур. Согласно методике В.И. Будаговского и В.Ф. Денисова [1–3] для каждой ткани вводится свой условный коэффициент: для коры и сердцевинных лучей – 3, для камбия – 9, для древесины и перимедуллярной зоны – 2, для сердцевины – 1. Так как мы брали обобщенные структуры, то для коры с учетом сердцевинных лучей получаем – 6, для камбия – 9, для древесины с учетом перимедуллярной зоны – 4, для сердцевины – 1. Для почек в указанных работах условный коэффициент не вводился, учитывая большую значимость этой

Таблица 4

**Векторы приоритетов для разных структур**

| Сорт | Кора | Камбий | Древесина | Сердцевина | Почки |
|---|---|---|---|---|---|
| Антоновка обыкновенная | 0,043 | 0,043 | 0,056 | 0,066 | 0,076 |
| Богатырь | 0,163 | 0,163 | 0,109 | 0,144 | 0,315 |
| Жигулевское | 0,395 | 0,395 | 0,437 | 0,205 | 0,315 |
| Коричное полосатое | 0,072 | 0,072 | 0,036 | 0,042 | 0,090 |
| Мельба | 0,163 | 0,163 | 0,182 | 0,291 | 0,159 |
| Ренет Черненко | 0,163 | 0,163 | 0,182 | 0,252 | 0,044 |
| $\lambda_{max}$ | 6,188 | 6,188 | 6,610 | 6,105 | 6,278 |
| ИС | 0,375 | 0,375 | 0,122 | 0,121 | 0,056 |
| ОС | 0,030 | 0,030 | 0,098 | 0,098 | 0,045 |

структуры, мы присвоили ей коэффициент – 8. Если теперь поделить каждый из этих коэффициентов на их сумму, то получим нормированный вектор весов $w = (0{,}214; 0{,}321; 0{,}143; 0{,}036; 0{,}286)^T$ (операция транспонирования, обозначенная значком Т, введена для того, чтобы записать вектор-столбец строкой). Если через $B$ обозначить матрицу размером $6 \times 5$, столбцами которой являются векторы приоритетов из табл. 4, то произведение $Bw$ дает вектор комплексной оценки $p = (0{,}055; 0{,}198; 0{,}372; 0{,}071; 0{,}169; 0{,}135)^T$ степени повреждения сортов, в основе которой лежит визуальная оценка. Сумма элементов вектора $p$ также равна единице. Найдем вектор весов $x$ для комплексной оценки степени повреждения сортов, основанной на данных компьютерного оценивания (см. табл. 2). Обозначим данные этой таблицы матрицей $C$, тогда, если найти $x$ из уравнения $Cx = p$, то некоторые веса будут отрицательными. Мы находили вектор $x$ методом случайного поиска из условия, что его элементы будут положительны, в сумме равны 1 и вектор $q = Cx$ будет наиболее близким к $p$. В результате получили вектор весов $x = (0{,}430; 0{,}435; 0{,}066; 0{,}002; 0{,}044; 0{,}0{,}23)^T$ и вектор комплексной оценки $q = (0{,}115; 0{,}197; 0{,}251; 0{,}116; 0{,}162; 0{,}159)^T$. Значения векторов $p$ и $q$ хотя и различаются, но задают одинаковый порядок расположения сортов. Векторы отражают степени повреждения, поэтому самым морозостойким будет сорт с наименьшими компонентами векторов $p$ и $q$. В табл. 5 сорта упорядочены по возрастанию этих векторов (в порядке убывания морозостойкости).

Таблица 5

**Морозостойкость сортов**

| Сорт | $p$ | $q$ |
|---|---|---|
| Антоновка обыкновенная | 0,055 | 0,115 |
| Коричное полосатое | 0,071 | 0,116 |
| Ренет Черненко | 0,135 | 0,159 |
| Мекинтош | 0,169 | 0,162 |
| Богатырь | 0,198 | 0,197 |
| Жигулевское | 0,372 | 0,251 |

Таким образом, самым морозостойким оказался сорт Антоновка обыкновенная, а наименее морозостойким – сорт Жигулевское. Порядок сортов по степени морозостойкости оказался одинаковым при обоих методах. Использование полученных весов *x* позволит быстро производить компьютерную оценку срезов и упорядочивать сорта по морозостойкости.

*Список литературы*

1. Будаговский, В.И. Зимостойкость корневой системы у карликовых и полукарликовых подвоев яблони / В.И. Будаговский // Изв. АНСССР. – Серия Биология. – 1954. – № 6. – С. 11–25.

2. Денисов, В.Ф. Методика лабораторного промораживания корней и побегов плодовых культур / В.Ф. Денисов // Бюллетень ЦГЛ им. И.В. Мичурина. – 1961. Вып. 11–12. – С. 79–81.

3. Методика определения зимостойкости и морозостойкости плодовых и ягодных культур / Под ред. Я.М. Нестерова. – Мичуринск, 1972. – 85 с.

4. Саати, Т.Л. Взаимодействие в иерархических системах / Т.Л. Саати // Техн. кибернетика. – 1979. – № 1. – С. 68–84.

5. Саати, Т. Аналитическое планирование. Организация систем / Т. Саати, К. Кернс. – М. : Радио и связь, 1991. – 224 с.

---

**Automation of Evaluation of Damage Rate of Tissue and Buds of Apple Cultivars under Artificial Exposition to Frost**

**A.I. Butenko, N.I. Savelyev, A.N. Yushkov, N.V. Zhukova**

*Michurinsk State Agrarian University, Michurinsk;*
*All-Russian Research Institute of Genetics and Selection of Fruits Plants*

**Key words and phrases:** coordination index; matrix of pair comparisons; frost-resistance; relative coordination; exposition to frost; degree of damage.

**Abstract:** The damage rate of tissue and buds of six apple cultivars was assessed by two methods: by means of a special computer program and visual score. The computer estimation was made on preliminary scanned cuts. Results obtained with both techniques consistently agreed.

---

© А.И. Бутенко, Н.И. Савельев, А.Н. Юшков, Н.В. Жукова, 2008