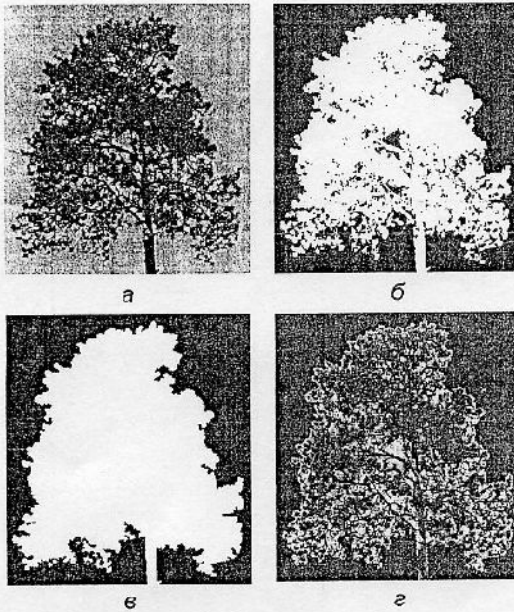


## Метрологические аспекты анализа изображений

В. В. ФОМИН\*, А. П. МИХАЙЛОВИЧ\*\*\*, А. С. ПОПОВ\*\*,  
Н. Ф. НИЗАМЕТДИНОВ\*\*, Ю. В. ШАЛАУМОВА\*\*

\* Коллеги в SIAMSC.

### Оптико-физические измерения



Этапы обработки изображения:  
— исходное изображение; б — пороговая сегментация (выделение маски кроны); в — выделение силуэта кроны; г — выделения просветов в кроне

существляется обработка маски кроны — удаляются мелкие частицы, но относящиеся к кроне, и закрываются просветы в ней. На втором этапе проводится выделение просветов. Для этого к результату вычитания инвертированного изображения силуэта кроны из исходного применяется функция «пороговая сегментация» либо по значениям интенсивности, либо по синей цветности (chroma-blue). Для визуального контроля результатов выделения силуэта кроны и просветов в ней используют функцию «наложение масок», при помощи которой накладывают маски силуэта и просветов на исходное изображение. На рисунке приведены изображения, полученные на различных этапах обработки исходной фотографии.

Отношение площади просветов в кроне к площади ее силуэта характеризует степень дефолиации  $D_d$ .

Силуэт кроны угнетенного дерева обычно более изрезан, чем в сравнении с силуэтом кроны дерева в хорошем состоянии. Для оценки степени изрезанности границ кроны был использован индекс формы  $I_f$ , который определяют вычитанием из единицы круглого фактора формы

$$f = 2\sqrt{\pi S/P},$$

где  $S, P$  — площадь и периметр кроны.

В качестве интегрального параметра, характеризующего состояние дерева, используют среднее геометрическое от степени дефолиации и индекса формы

$$I_s = \sqrt{D_d I_f}.$$

Значения всех приведенных выше параметров лежат в пределах от нуля до единицы.

Исследуемое программное решение является полуавтоматическим. Это означает, что оператору необходимо подбирать значения параметров настройки обработки изображения. У него есть также возможность редактировать описанные выше маски измеряемых объектов вручную. Ручное редактирование используют только в том случае, когда подбором параметров настройки обработки изображения не удается достичь надлежащего качества выделения масок.

Точность МВИ определяется, во-первых, условиями получения изображения (в том числе настройками фото- и видеокамеры), а во-вторых, действиями оператора при его обработке. Поэтому предлагаемый подход содержит два этапа.

На первом этапе проводят анализ факторов, определяющих условия съемки и настройки аппаратуры для получения изображения, их ранжирование по степени влияния на качество изображения исходя из априорной информации. После этого для каждого выбранного для анализа фактора устанавливают диапазон допустимого варьирования его значений.

Далее выполняют исследования с применением методов планирования эксперимента. Проводят фотосъемку объекта при двух уровнях факторов с учетом всех их возможных комбинаций. По результатам измерений строят математическую модель вида

$$p = b_0 + k_1 x_1 + \dots + k_n x_n + k_{12} x_1 x_2 + \dots + k_{n-1n} x_{n-1} x_n + \dots + k_1 k_2 \dots k_n x_1 x_2 \dots x_n.$$

Здесь в качестве зависимой переменной выступает параметр оптимизации, определяемый по формуле

$$p_i = \frac{|y_i - y_{оп}|}{y_{оп}} \cdot 100, \quad (1)$$

где  $y_{оп}$  — опорное значение;  $y_i$  — результат  $i$ -го измерения, а независимыми переменными являются факторы  $x_1, x_2, \dots, x_n$ .

В качестве опорного было принято среднее значение нескольких результатов обработки изображения, полученного в наилучших, с точки зрения исследователя, условиях (сфокусированное, снятое при хорошем освещении о высоком разрешении и контрасте). Его обработке проводил наиболее компетентный оператор. Из всех предлагаемых в [16] способов получения принятого опорного значения только описанный выше пригоден для объекта измерения.

Параметр оптимизации позволяет легко интерпретировать результаты эксперимента. Он представляет собой относительное отклонение результата измерений (в процентах), полученного при данном сочетании уровней факторов, от опорного значения. Параметр оптимизации стремится к нулю при приближении результата измерения к опорному значению.

По коэффициенту регрессии судят о степени влияния соответствующего фактора на параметр оптимизации. Значимость коэффициентов при факторах показывает, что оператор при помощи параметров настроек программы обработки изображения не может уменьшить их влияния.

Итогом первого этапа является выдача рекомендаций по выбору условий съемки для устранения влияния значимых факторов. Проведение такого исследования позволяет также выбрать оптимальные настройки аппаратуры для получения изображений меньшего объема при сохранении

требуемого качества, что существенно влияет на скорость их обработки и важно для хранения цифровых фотографий на различных носителях информации.

Разрабатываются также рекомендации по выбору значений параметров настройки программы, способствующих уменьшению параметра оптимизации. В этом случае оператор, проводя настройку, может контролировать качество выделения маски не только визуально, но и руководствуясь формализованными критериями. Это позволяет уменьшить изменчивость результатов измерений, связанную с работой операторов.

Второй этап заключается в оценке показателей точности (правильности и прецизионности) в соответствии со стандартом [16].

Фотографирование тестового объекта проводили цифровой зеркальной фотокамерой Canon EOS 350D. При фотосъемке изменены разрешение, контраст и резкость.

Для измерений и анализа в соответствии с матрицей планирования эксперимента были сделаны фотографии при максимальных и минимальных значениях описанных выше параметров фотокамеры, которые при построении модели принимали кодированные значения «-1» и «1». Адекватность модели проверяли по фотографиям объекта (тестовая выборка), сделанным при нулевых уровнях (средних значениях настроек фотоаппарата) факторов.

Фактор «условия съемки» является трудно формализуемым. Он представляет собой сочетание условий среды, которые определяют освещенность исследуемого объекта. Фотосъемка была выполнена с 8.30 до 9.00 и с 12.30 до 13.00 в солнечную погоду, при отсутствии облачности. Освещенность измерена под пологом леса люксметром Ю16 с селеновым фотозлементом Ф102 и составила 14 и 90 лк для утренней и дневной съемки, соответственно.

Полученные фотографии были обработаны при помощи описанной выше методики. Статистическая обработка проведена в статистическом пакете «R».

В таблице приведены параметры множественной регрессионной модели, которая устанавливает зависимость параметра оптимизации (1) и характеристик настройки фотокамеры, а также условий фотосъемки.

**Коэффициенты множественной регрессионной модели, устанавливающей взаимосвязь параметра оптимизации, характеристик настройки фотокамеры и условий фотосъемки**

Параметры модели	Значения коэффициентов, %
Свободный член, $b_0$	8,8
Условия съемки, $x_1$	-4,6
Разрешение, $x_2$	-1,7
Резкость, $x_3$	-2,6
Условия съемки и разрешение, $x_1x_2$	1,1
Разрешение и резкость, $x_2x_3$	1,0
Условие съемки, разрешение и контраст, $x_1x_2x_4$	-1,0

Улучшенный коэффициент детерминации модели  $R_{adj}^2 = 0,93$ . Все коэффициенты при переменных являются статистически значимыми на уровне 0,05 и выше. Значение коэффициента позволяет оценить вклад в параметр оптимизации (отклонение от опорного значения) в процентах.

Опорное значение было выбрано с использованием априорной информации об изображении наилучшего качества (значение всех уровней факторов равно 1).

Эмпирические значения параметра оптимизации лежат в интервале 0—20,2 %. По отклонениям экспериментальных значений, полученных на тестовой выборке, от расчетных была рассчитана среднеквадратическая погрешность (RMSE), равная 3,0 %.

Линейные эффекты данной модели хорошо интерпретируются. При улучшении условий съемки, увеличении разрешения и резкости параметр оптимизации уменьшается. Интерпретация эффектов взаимодействия не так однозначна.

При их анализе рекомендуется учитывать знаки линейных эффектов соответствующих факторов. Если эффект взаимодействия имеет знак плюс, а линейные эффекты отрицательны, то следует выбирать сочетание «-1» и «-1» [17]. Это означает, что при уменьшении значений факторов, например, при снижении разрешения и уменьшении резкости погрешность измерения увеличивается.

Для интерпретации эффекта взаимодействия трех факторов, произведение двух из них можно условно считать одним фактором. В этом случае тройное взаимодействие сводится к парному. Для взаимодействия условий съемки, разрешения и контраста два последних фактора рассматривают как один. При этом знаки при  $x_1$  и  $x_1x_4$  (положительный коэффициент при данном факторе не значим, поэтому в таблице не приведен) разные. В этом случае рассматривают численные значения коэффициентов и учитывают больший [17]. Здесь учтен фактор «условия съемки». Таким образом, при улучшении условий съемки сочетание данных факторов приводит к снижению погрешности измерения.

Анализ данных таблицы позволил установить, что наибольшее влияние на параметр оптимизации оказывают «условия съемки» -4,6 %. Статистическая значимость коэффициента при факторе «контраст» была ниже требуемой, однако данный фактор влияет на параметр оптимизации в сочетании с условиями фотосъемки и разрешением. Их совместный вклад в параметр оптимизации составляет наименьшее из всех рассмотренных значений -1,0 %.

При проведении фотосъемки с настройками разрешения, контраста и резкости на уровне, который соответствует кодированному значению 0 ( $x_1 = x_2 = x_3 = x_4 = 0$ ), оценкой неучтенных факторов, в том числе влияния оператора, является значение коэффициента  $b_0 = 8,8$  %.

Модель позволяет сформулировать дополнительные рекомендации по проведению фотосъемки для устранения влияния наибольших факторов. В данном примере это, в первую очередь, относится к условиям съемки. Для снижения влияния этого фактора можно сформулировать требование о необходимости проведения фотосъемки в интервале с 11 до 14 ч дня в ясную, солнечную погоду.

Оценки показателей точности (правильности и прецизионности) проводили в соответствии с [16]. В эксперименте принимали участие шесть операторов. Каждый из них выполнил пять измерений на четырех изображениях деревьев, которые произрастали в условиях с разным уровнем загрязнения атмосферы промышленными выбросами металлургического завода. Был проведен графический анализ совместности результатов измерений. Из дальнейшего анализа исключили значения измерений, признанные выбросами. По результатам многократных измерений, выполненных на описанных выше изображениях, рассчитали дисперсии повторяемости и воспроизводимости, а также оценили системати-

ческую погрешность метода измерений. Значения этой погрешности лежат в интервале 1—7 %.

Разработка алгоритма обработки изображений и тестирование автоматизированной методики оценки состояния дерева также были проведены на 32 фотографиях деревьев *Picea abies* Karst, *Abies alba* Mill, *Larix Decidua* Mill и *Pinus Sylvestris* L., полученных в ходе выполнения научно-исследовательского проекта по визуальной оценке состояния лесов Европы SUNUSILVA [18].

Сравнительный анализ двух методик оценки состояния деревьев показал, что расхождения между категориями при автоматизированной оценке ниже, чем при визуальной. Этот факт позволяет утверждать, что при визуальном наблюдении происходит завышение степени угнетения деревьев.

Разработанный подход по выявлению недостатков МВИ и определению показателей их точности является универсальным и может быть использован при исследовании методик выполнения измерений по изображениям, полученным на макро- и микроуровнях.

Работа выполнена при финансовой поддержке фондов РФФИ (грант № 06-04-49359), а также ФЦНТП (№ 2007-3-1.3-07-09-012).

#### Литература

1. Гроховский В. И. // Цифровая микроскопия: Матер. школы-семинара. — Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ. — 2001. — С. 18.
2. Веселов И. Н. и др. // Вестник УГТУ-УПИ. — 2005. — № 10. — С. 41.
3. Marias K. e. a. // *Europ. J. Radiology*. — 2004. — V. 52. — P. 276.
4. Chen W. e. a. // *Computer Methods and Programs in Biomedicine*. — 2005. — V. 79. — P. 59.
5. Mangin J.-F. e. a. // *Artificial Intelligence in Medicine*. — 2004. — V. 30. — P. 177.
6. Stein L. H. e. a. // *Aquaculture*. — 2006. — V. 261. — P. 695.
7. Scott J. e. a. // *Remote Sensing of Environment*. — 2003. — V. 88. — P. 195.
8. Drăguț L., Blaschke T. // *Geomorphology*. — 2006. — V. 81. — P. 330.
9. Jakubauskas M. E., Legates D. R., Kastens J. H. // *Computers and Electronics in Agriculture*. — 2002. — V. 37. — P. 127.
10. BS 3406—4:1993. Method for Determination of Particle Size Distribution. Pt. 4. Guide to Microscope and Image Analysis Method.
11. ASTM E 1245—03. Standard Practice for Determining the Inclusion or Second-phase Constituent Content of Metal by Automatic Image Analysis.
12. ISO 13322-1:2000. Static Image Analysis Methods.
13. ГОСТ Р 8.563—96. ГСИ. Методики выполнения измерений.
14. Мигачев Б. С. // Законодательная и прикладная метрология. — 1997. — № 2. — С. 11.
15. Сычев Е. И. // Законодательная и прикладная метрология. — 1997. — № 4. — С. 45.
16. ГОСТ Р ИСО 5725—2002. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Ч. 1—6.
17. Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. — М: Наука, 1976.
18. Muller E., Stierlin H. R. *Sanasilva. Tree Crown Photos*. — Birmensdorf (Switzerland): Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research, 1990.

Дата одобрения 06.11.2007 г.