

О.А. Артюхова, А.В. Самородов

СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК РЕЗКОСТИ МИКРОСКОПИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ МЕДИКО-БИОЛОГИЧЕСКИХ ПРЕПАРАТОВ

Аннотация

Проведено сравнительное исследование и определены показатели качества характеристик резкости в задачах автоматической регистрации микроскопических изображений медико-биологических препаратов.

Автоматизированная микроскопия имеет широкую область применения в биомедицинских приложениях, связанных с анализом медико-биологических препаратов (МБП). Необходимым компонентом автоматизированной микроскопической системы является блок автофокусировки микроскопа, обеспечивающий возможность регистрации изображений МБП в автоматическом режиме.

Существуют две основные группы методов автофокусировки: активные и пассивные. В активных методах автофокусировки проводится измерение расстояния до объекта (предметного стекла), по результатам которого выполняется подстройка оптической системы. Данные методы обладают высокой скоростью и могут использоваться для проведения анализа изображений МБП в реальном времени. Однако применение активных методов требует выполнения калибровки положения предметного стола микроскопа, соответствующего наиболее резкому изображению. Это требование неприменимо на практике при анализе МБП, так как они обычно имеют различную толщину и множество отражающих поверхностей [1].

Пассивные методы автофокусировки основаны на анализе зарегистрированных изображений. Для серии изображений, зарегистрированных при перемещении предметного стола микроскопа в вертикальной плоскости, рассчитываются характеристики резкости и строится фокусирующая кривая, представляющая собой зависимость характеристики резкости изображения от положения предметного стола микроскопа вдоль оси z . Наиболее резкому изображению соответствует максимальное значение характеристики резкости. При сканировании препарата вдоль вертикальной оси и сравнении рассчитанных значений характеристики резкости можно найти положение предметного стола микроскопа, соответствующее наиболее резкому изображению.

Методы пассивной автофокусировки являются более медленными из-за необходимости регистрации серии изображений, однако на них не оказывают влияния отражающие поверхности и толщина

препарата, и поэтому они более применимы в приложениях автоматизированной микроскопии МБП [1].

Процесс автофокусировки микроскопа на основе пассивных методов включает в себя расчет характеристики резкости изображения и нахождение наиболее резкого изображения с использованием выбранной стратегии оценивания фокусирующей кривой и поиска ее максимума. Причем качество работы системы автофокусировки во многом определяет выбор алгоритма расчета характеристики резкости.

В зарубежной и отечественной научно-технической литературе [1]-[14] опубликовано множество алгоритмов расчета различных характеристик резкости и частично приведены результаты их сравнения. Однако представленных данных недостаточно для обоснованного выбора характеристики резкости при использовании автоматизированных микроскопических систем анализа МБП. В настоящей статье приводится сравнительное исследование качества различных характеристик резкости для решения задач автоматизированной фокусировки микроскопических систем в процессе анализа МБП.

Характеристики резкости

Существующие характеристики резкости можно подразделить на четыре группы [1]-[11]:

- 1) характеристики, основанные на вычислении производной;
- 2) статистические характеристики;
- 3) характеристики гистограммы изображения;
- 4) характеристики, основанные на преобразовании изображения.

Характеристики, основанные на вычислении производной. В рассматриваемой группе выделяют следующие характеристики:

- 1) абсолютный пороговый градиент (Thresholded Absolute Gradient);
- 2) квадрат градиента (Squared Gradient);
- 3) градиент Бреннера (Brenner Gradient);
- 4) градиент Тененбаума (Tenenbaum Gradient, Tenengrad);

- 5) сумма модифицированных лапласианов (Sum of Modified Laplace);
- 6) энергия лапласиана (Energy Laplace);
- 7) контраст (Contrast);
- 8) сумма квадратов гауссовых производных (Sum of Squared Gaussian Derivatives).

Недостатком большинства указанных характеристик является их чувствительность к высокочастотному шуму [6].

Статистические характеристики. К статическим характеристикам относятся следующие:

- 1) дисперсия (Variance);
- 2) нормированная дисперсия (Normalized Variance);
- 3) автокорреляция (AutoCorrelation);
- 4) корреляция, основанная на дисперсии (Standard Deviation-Based Correlation).

Статистические характеристики являются менее чувствительными к шуму, чем характеристики, основанные на вычислении производной [6].

Характеристики гистограммы изображения. По гистограмме изображения вычисляются следующие характеристики резкости:

- 1) размах (Range Algorithm);
- 2) надпороговое среднее (Thresholded Content);
- 3) характеристика Мейсона и Грина (Mason and Green's Algorithm);
- 4) пороговое число пикселей (Thresholded Pixel Count);
- 5) энергия изображения (Image Power);
- 6) энтропия (Entropy).

Характеристики, основанные на преобразовании изображения. В таких характеристиках используется отношение энергий верхних и нижних пространственных частот изображения. К ним относятся:

- 1) характеристика Файрстоуна (Firestone's Algorithm of Spectral Analysis);
- 2) характеристика Буэно-Ибарра (Bueno-Ibarra's Algorithm);
- 3) энергия переменной составляющей (AC Energy Algorithm);
- 4) характеристика Шена и Чена (Shen & Chen's Algorithm);
- 5) байесовская энтропия спектра (Bayes-Spectral-Entropy-Based Focus Measure).

Первые две характеристики основаны на быстром преобразовании Фурье, последние три – на дискретном косинусном преобразовании.

Оценка качества характеристик резкости

Критерии выбора и оценки характеристик резкости предлагались многими исследователями при сравнении новых методов расчета с уже существующими. Для корректного сопоставления характеристик резкости выполняется нормировка их фокусировочных кривых, а кривые, имеющие глобальный минимум для резкого изображения, инвертируются [8], [10].

Существуют два типа критериев оценки характеристик резкости: статические и динамические. В

большинстве работ, посвященных сопоставлению характеристик резкости, рассматриваются статические критерии. При этом построенные на основе той или иной характеристики резкости фокусировочные кривые оцениваются, исходя из общих соображений удобства их использования, без конкретизации метода поиска их максимума.

Динамические критерии были введены для оценки удобства применения различных характеристик резкости на практике. Данные критерии учитывают скорость вычисления характеристики, динамическую точность и динамическую воспроизводимость [2].

В настоящей работе сравнение характеристик резкости проводилось по следующим пяти статическим критериям качества фокусировочных кривых:

- 1) точность;
- 2) локальные максимумы;
- 3) область значений;
- 4) ширина;
- 5) уровень шума.

Критерий точности основан на расстоянии между положением максимума фокусировочной кривой и установленным вручную положением предметного стола микроскопа, соответствующим наиболее резкому изображению. Чем меньше значение данного расстояния, тем более качественной является характеристика резкости.

Критерий локальных максимумов учитывает их количество на фокусировочной кривой. Наличие нескольких локальных максимумов может заикнуть алгоритм автофокусировки и увеличить его вычислительную сложность. Чем меньше локальных максимумов имеет кривая, тем проще и быстрее можно найти ее глобальный максимум.

Критерий области значений учитывает расстояние между двумя соседними локальными минимумами, примыкающими к глобальному максимуму фокусировочной кривой. Наличие более широкой области между локальными минимумами облегчает нахождение максимума кривой и позволяет избежать ошибочного нахождения локального максимума.

Критерий ширины оценивает ширину фокусировочной кривой на уровне 50 % от максимума. Чем меньше это значение, тем более острой является вершина кривой и тем точнее осуществляется обнаружение положения максимума.

Критерий уровня шума основан на суммировании квадратов вторых производных, вычисляемых в результате свертки фокусировочной кривой с оператором Лапласа. При этом значение кривой в вершине исключается для предотвращения занижения оценки качества характеристик резкости, дающих фокусировочные кривые с узким пиком.

Результаты экспериментальных исследований характеристик резкости

Для проведения сравнительных исследований характеристик резкости были зарегистрированы

Результаты определения баллов характеристик резкости по пяти критериям качества

Характеристика резкости		Баллы по критериям качества				
№	Наименование	Точность	Локальный максимум	Область значений	Ширина	Уровень шума
1	Абсолютный пороговый градиент	1,25	5,45	14,00	1,60	14,00
2	Квадрат градиента	1,00	6,13	13,89	1,02	5,21
3	Градиент Бреннера	1,00	1,00	12,72	1,00	1,97
4	Градиент Тененбаума	1,00	1,00	12,43	1,01	1,51
7	Контраст	1,43	1,34	3,91	3,48	2,37
8	Сумма квадратов гауссовых производных	1,07	1,00	10,87	1,15	1,00
9	Дисперсия	1,67	1,34	2,54	3,69	1,39
10	Нормированная дисперсия	1,67	1,34	2,55	3,69	1,38
12	Корреляция, основанная на дисперсии	1,64	1,34	2,63	3,71	1,39
18	Энтропия	14,00	14,00	1,00	14,00	13,15
19	Характеристика Файрстоуна	1,50	1,34	5,87	2,70	1,18
21	Энергия переменной составляющей	1,67	1,34	2,54	3,69	1,39
22	Характеристика Шена и Чена	1,67	1,34	2,55	3,68	1,38
23	Байесовская энтропия спектра	1,00	1,00	5,07	4,00	2,48

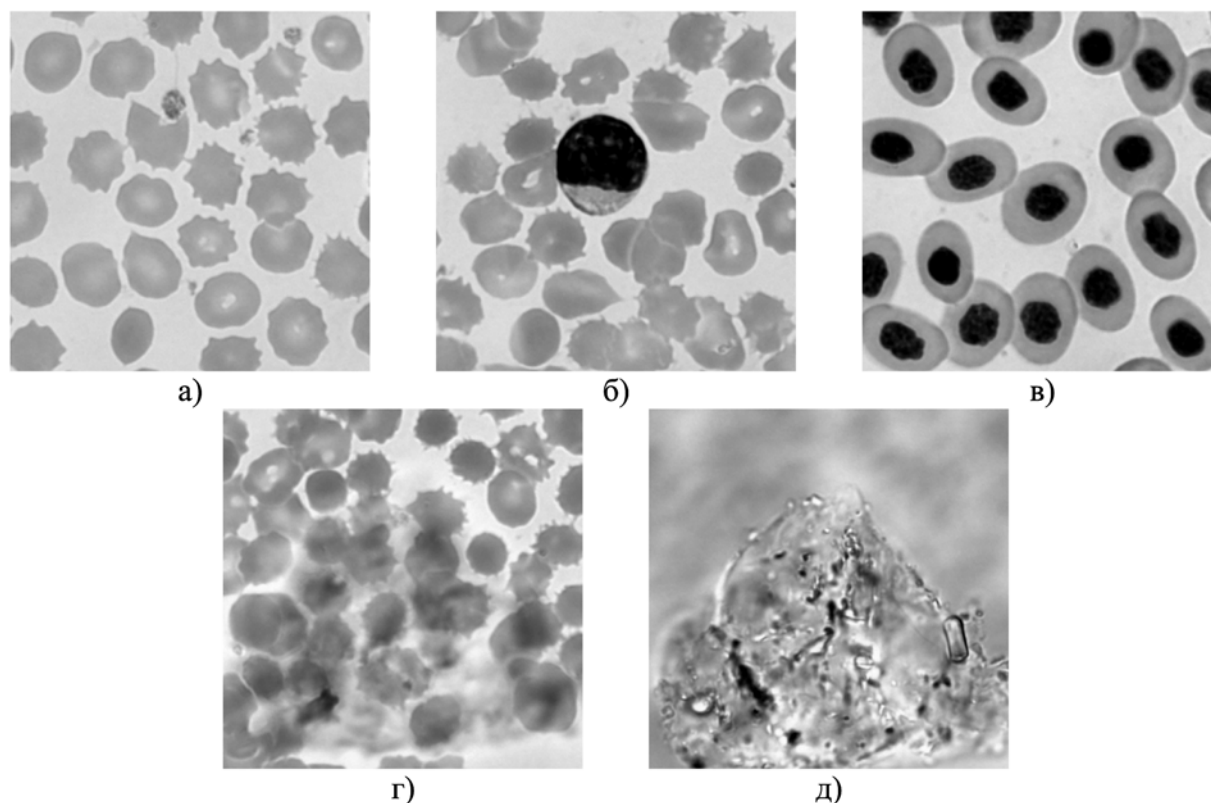


Рис. 1. Анализируемые изображения: а) – эритроциты в мазках крови человека; б) – лейкоциты в мазках крови человека; в) – клетки в мазках крови рыбы; г), д) – артефакты в мазках крови человека

4 серии изображений различного типа. Первая серия состояла из изображений эритроцитов в мазках крови человека, вторая – из изображений, содержащих лейкоциты в этих же мазках. В третьей серии были представлены мазки крови рыб. Четвертая серия включала в себя изображения клеток крови, содержащие артефакты: капли старого иммерсионного масла и пылинки. Указанные артефакты располагались в плоскости, отличной от плоскости наиболее резкого изображения препарата, и были четко видны при сильной дефокусировке микроскопа. Каждая из четырех серий содержала 10 стеков по 301 изображению с различной степенью дефокусировки, при этом резким было изображение № 151 (рис. 1).

Регистрация изображений проводилась на автоматизированном микроскопе, входящем в созданный в МГТУ им. Н.Э. Баумана аппаратно-программный комплекс «Гранат-Гемо». Расстояние по вертикали между соседними положениями предметного стола, в которых регистрировались изобра-

жения, было равно 0,4 мкм, что не превышает глубины резкости видеомикроскопической системы. Для регистрации изображений использовали иммерсионный микрообъектив (с увеличением 100x и числовой апертурой 1,25) и цветную видеокамеру «Pixelink PL-B873CU». Полученные изображения размером 1200×1800 пикселей преобразовывались к цветовым координатам YCbCr, и для дальнейшего анализа использовался канал Y (luminance).

Приведенные выше 23 характеристики резкости рассчитывались для каждого изображения из 40 стеков, после этого производились построение фокусируемых кривых и их сравнительная оценка. Нумерация характеристик резкости и соотношения для их расчета приведены в приложении.

После получения экспериментальных результатов из количественного анализа были исключены девять характеристик резкости, как явно непригодные для практического использования. Так, из-за явного отсутствия глобального экстремума фокусируемых кривых и низкой воспроизводимости

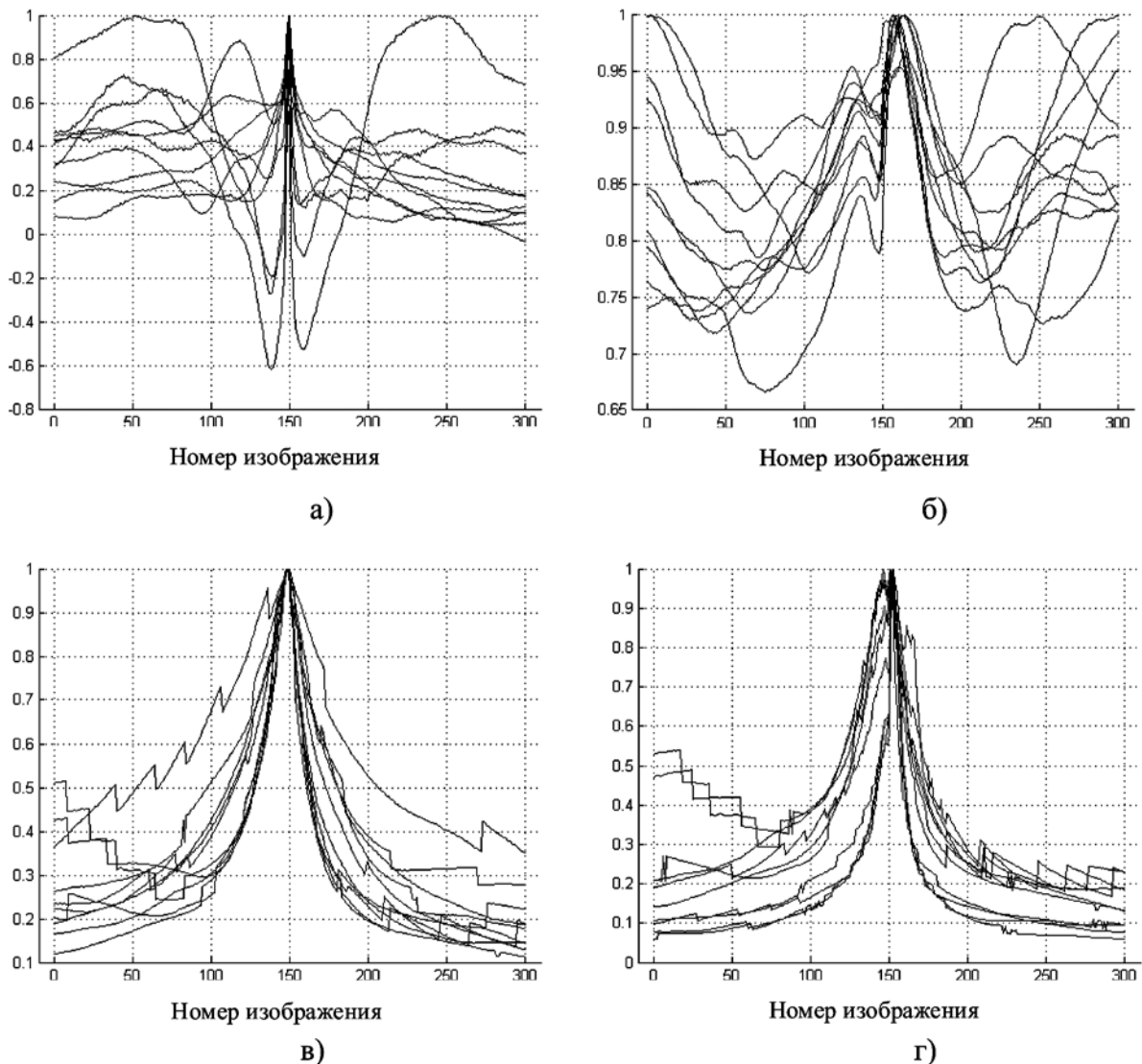


Рис. 2. Графики фокусируемых кривых для различных характеристик резкости: а) – характеристика № 11; б) – характеристика № 16; в) – характеристика № 14; г) – характеристика № 15

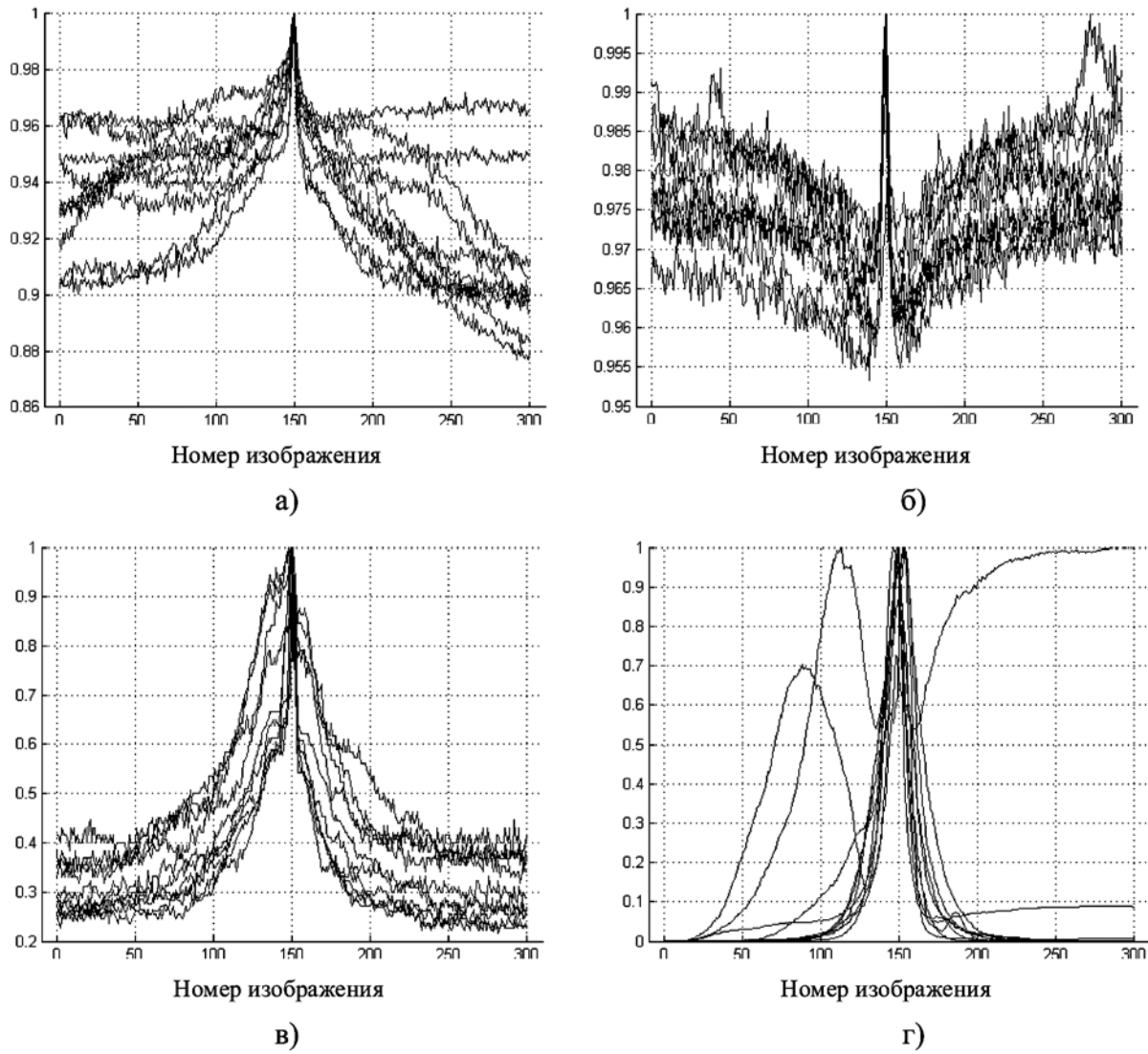


Рис. 3. Графики фокусируемых кривых для различных характеристик резкости: а), б) – характеристика № 5; в) – характеристика № 13; г) – характеристика № 20

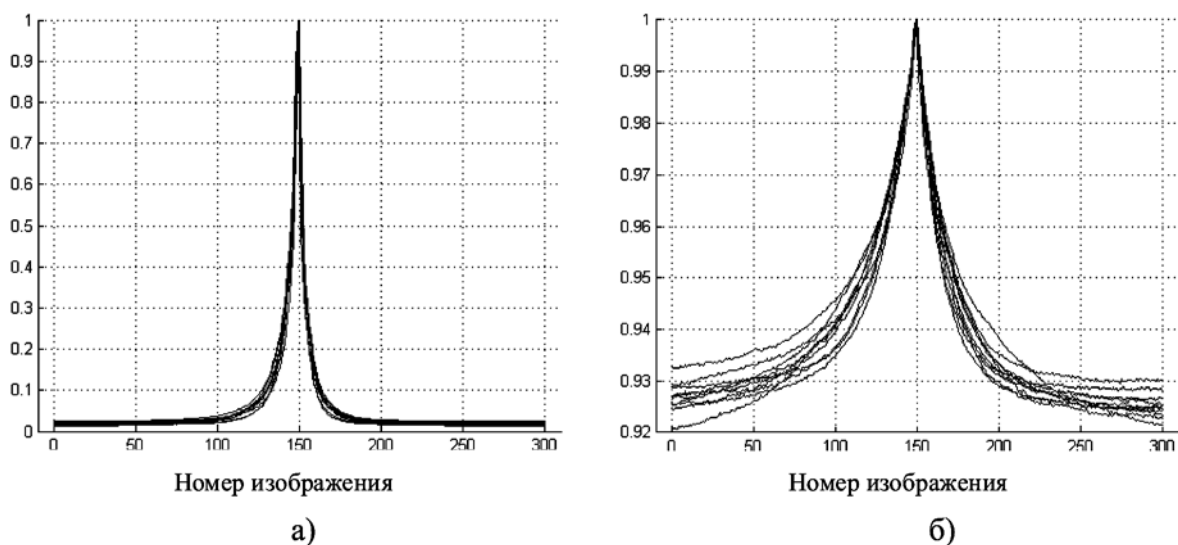


Рис. 4. Графики фокусируемых кривых для различных характеристик резкости: а) – характеристика № 8; б) – характеристика № 23

Соотношения для расчета характеристик резкости изображения

№ п/п	Название характеристики	Способ вычисления
1. Характеристики, основанные на вычислении производной		
1	Абсолютный пороговый градиент (Thresholded Absolute Gradient)	$F_{th_grad} = \sum_{Height} \sum_{Width} f(x+1, y) - f(x, y) ,$ <p>где $f(x+1, y) - f(x, y) \geq \theta$; θ – некоторое пороговое значение; $f(x, y)$ – яркость пиксела (x, y) на полутоновом изображении</p>
2	Квадрат градиента (Squared Gradient)	$F_{sq_grad} = \sum_{Height} \sum_{Width} (f(x+1, y) - f(x, y))^2,$ <p>где $[f(x+1, y) - f(x, y)]^2 \geq \theta$</p>
3	Градиент Бреннера (Brenner Gradient)	$F_{Brenner} = \sum_{Height} \sum_{Width} (f(x+2, y) - f(x, y))^2,$ где $[f(x+2, y) - f(x, y)]^2 \geq \theta$
4	Градиент Тененбаума (Tenenbaum Gradient, Tenengrad)	$F_{Tenengrad} = \sum_{Height} \sum_{Width} [f(x, y) \otimes S_x(x, y)]^2 + [f(x, y) \otimes S_y(x, y)]^2,$ <p>где $S_x(x, y), S_y(x, y)$ – операторы Собела</p>
5	Сумма модифицированных лапласианов (Sum of Modified Laplace)	$F_{SML} = \sum_{Height} \sum_{Width} f(x, y) \otimes L_x(x, y) + f(x, y) \otimes L_y(x, y) ,$ <p>где $L_x(x, y), L_y(x, y)$ – операторы Лапласа</p>
6	Энергия лапласиана (Energy Laplace)	$F_{energy_Laplace} = \sum_{Height} \sum_{Width} [f(x, y) \otimes L(x, y)]^2,$ где $L(x, y) = \begin{bmatrix} -1 & -4 & -1 \\ -4 & 20 & -4 \\ -1 & -4 & -1 \end{bmatrix}$
7	Контраст (Contrast)	$F_{contrast} = \frac{1}{N \cdot (N-1)} \left(N \cdot \sum_{i,j} p(x, y)^2 - \left(\sum_{i,j} p(x, y) \right)^2 \right),$ <p>где $N = H \cdot W$ – количество пикселей изображения; $p(x, y) = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & 9 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \otimes f(x, y)$</p>
8	Сумма квадратов гауссовых производных (Sum of Squared Gaussian Derivatives)	$F_{sum_Gaus_deri} = \frac{1}{H \cdot W} \sum_{Height} \sum_{Width} [f(x, y) \otimes G_x(x, y, \sigma)]^2 + [f(x, y) \otimes G_y(x, y, \sigma)]^2,$ <p>где $G_x(x, y, \sigma)$ и $G_y(x, y, \sigma)$ – производные гауссова фильтра соответственно в горизонтальном и вертикальном направлениях; $\sigma = \frac{d}{2\sqrt{3}}$; d – размер самого маленького объекта на изображении</p>
2. Статистические характеристики		
9	Дисперсия (Variance)	$F_{variance} = \frac{1}{H \cdot W} \sum_{Height} \sum_{Width} (f(x, y) - \mu)^2,$ <p>где μ – среднее значения яркости изображения</p>
10	Нормированная дисперсия (Normalized Variance)	$F_{normed_variance} = \frac{1}{H \cdot W \cdot \mu} \sum_{Height} \sum_{Width} (f(x, y) - \mu)^2$
11	Автокорреляция (AutoCorrelation)	$F_{auto_corr} = \sum_{Height} \sum_{Width} f(x, y) \cdot f(x+1, y) - \sum_{Height} \sum_{Width} f(x, y) \cdot f(x+2, y)$
12	Корреляция, основанная на дисперсии (Standard Deviation-Based Correlation,	$F_{corr_stddev} = \sum_{Height} \sum_{Width} f(x, y) \cdot f(x+1, y) - H \cdot W \cdot \mu^2$

№ п/п	Название характеристики	Способ вычисления
3. Характеристики гистограммы изображения		
13	Размах (Range Algorithm)	$F_{range} = \max_i(h(i) > 0) - \min_i(h(i) > 0)$, где $h(i)$ – гистограмма яркости изображения
14	Надпороговое среднее (Thresholded Content)	$F_{menmay} = \sum_{i>T} i \cdot h(i)$, где T – некоторое пороговое значение
15	Характеристика Мейсона и Грина (Mason and Green's Algorithm)	$F_{masgrm} = \sum_{i>T} h(i) \cdot (i - T)$, где $T = \frac{\sum_x \sum_y \Delta(x, y) \cdot f(x, y)}{\sum_x \sum_y \Delta(x, y)}$; $\Delta(x, y) = 2(f(x, y - 1) - f(x, y + 1))^2 + 2(f(x - 1, y) - f(x + 1, y))^2 +$ $+(f(x - 1, y - 1) - f(x + 1, y + 1))^2 + (f(x - 1, y + 1) - f(x + 1, y - 1))^2$
16	Пороговое число пикселей (Thresholded Pixel Count)	$F_{pixel_count} = \sum_{Height} \sum_{Width} s(f(x, y), \theta)$, где $s(f(x, y), \theta) = \begin{cases} 1, & \text{если } f(x, y) \leq \theta; \\ 0, & \text{в противном случае} \end{cases}$
17	Энергия изображения (Image Power)	$F_{power} = \sum_{Height} \sum_{Width} f(x, y)^2$, где $f(x, y) \geq \theta$
18	Энтропия (Entropy)	$F_{entropy} = - \sum_{intensities} p(i) \cdot \log_2(p(i))$, где $p(i) = \frac{h(i)}{H \cdot W}$ – вероятность нахождения пикселя с яркостью i
4. Характеристики, основанные на преобразовании изображения		
19	Характеристика Файрстоуна (Firestone's Algorithm of Spectral Analysis)	$F_{spectral} = \sum_i P_i \cdot \log_{10}(i)$, где P_i – процентное содержание энергии в i -й спектральной компоненте
20	Характеристика Буэно-Ибарра (Bueno-Ibarra's Algorithm)	$F_{Bi}(k) = 1 - r(FSV_1, FSV_k)$, где $r(\dots)$ – коэффициент корреляции Пирсона; $FSV_k = \left[H_1^k(f) ^2, H_2^k(f) ^2, \dots, H_q^k(f) ^2 \right]$ – результат конкатенации векторов $ H_i^k(f) ^2; H_i^k(f) ^2$ – квадрат Фурье-преобразования вектора V_i^k ; $V_1^k = f(1, y_0, \dots, y_M)_k; V_2^k = f(1 + D, y_0, \dots, y_M)_k; V_q^k = f((q - 1) \cdot D + 1, y_0, \dots, y_M)_k$; Δ – расстояние между соседними векторами V_i^k ; q – общее количество равноудаленных векторов V_i^k
21	Энергия переменной составляющей (AC Energy Algorithm)	$F_{ACEn} = \sum_{u=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{N-1} F_C(u, v)^2; (u, v) \neq (0, 0)$, где $F_C(u, v)$ – дискретное косинусное преобразование изображения
22	Характеристика Шена и Чена (Shen & Chen's Algorithm)	$F_{ACDC} = \frac{E_{AC}}{E_{DC}} = \frac{\sum_{u=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{N-1} F_C(u, v)^2 \Big _{(u,v) \neq (0,0)}}{F_C(0, 0)^2}$
23	Байесовская энтропия спектра (Bayes-Spectral-Entropy-Based Focus Measure)	$F_{Be}(f) = 1 - \sum_{u=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{N-1} \tilde{F}_N(u, v)^2 = 1 - \frac{\sum_{u=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{N-1} F_N(u, v) ^2}{\left(\sum_{u=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{N-1} F_N(u, v) \right)^2}$, где $\tilde{F}_N[f](u, v) = \frac{ F_N(u, v) }{\sum_{u, v \in D} F_N(u, v) }$

были исключены характеристики резкости № 11, 14, 15, 16 и 17 (рис. 2).

Кроме этого, были исключены характеристики резкости № 5, 6, 13 и 20, поскольку отношение сигнал-шум для их фокусируемых кривых было крайне низким, а значения характеристик существенно изменялись при переходе от одного поля зрения к другому даже в пределах одного препарата (рис. 3).

Результаты количественного сравнения отобранных 14-ти характеристик резкости приведены в табл. 1. Численные значения для критериев качества усреднялись для каждой характеристики резкости по всем 40 стекам изображений. При этом каждой характеристике резкости был присвоен балл таким образом, чтобы наилучшей по данному критерию характеристике соответствовал балл 1, а наихудшей – 14. Остальным характеристикам пропорционально присваивались дробные баллы.

В результате анализа полученных экспериментальных данных можно сделать вывод, что наилучшей характеристикой резкости является характеристика № 8 «Сумма квадратов гауссовых производных» (Sum of Squared Gaussian Derivatives). Она обладает высокими показателями по большинству приведенных критериев оценки: высокой точностью нахождения резкого изображения, острым пиком, высоким значением отношения сигнал-шум. Кроме того, данная характеристика нечувствительна к артефактам на препарате. Также можно отметить высокое качество характеристики № 23 «Байесовская энтропия спектра» (Bayes-Spectral-Entropy-Based Focus Measure). Указанная характеристика резкости обеспечивает наиболее точное нахождение резкого изображения и имеет достаточную область значений (рис. 4).

Таким образом, в результате проведенных исследований были выбраны две характеристики резкости, пригодные для использования в системах автоматизированной микроскопии при анализе МБП. Дальнейшая работа будет направлена на выбор стратегии оценивания фокусирующей кривой и поиска ее максимума, а также на проведение испытаний автоматизированной микроскопической системы с учетом динамических критериев качества.

Представленные результаты получены при проведении НИР в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 гг., ГК № П2276 от 13.11.2009 г. и при поддержке гранта РФФИ 10-08-01310-а.

Список литературы:

1. Wu Q., Merchant F.A., Castleman K.R. Microscope Image Processing. – Oxford: Academic Press, 2008. P. 548.
2. Liu X.Y., Wang W.H., Sun Y. Dynamic evaluation of autofocus for automated microscopic analysis of blood smear and pap smear // J. of Microscopy. 2007. Vol. 227. PP. 15-23.

3. Kristan M., Pers J., Perse M., Kovacic S. A Bayes-Spectral-Entropy-Based Measure of Camera Focus Using a Discrete Cosine Transform // Pattern Recognition Letters, 2006. № 27(13). PP. 1419-1580.
4. Shen C.-H., Chen H.H. Robust focus measure for low-contrast images / International Conference on Consumer Electronics ICCE'06. Las Vegas, USA: Digest of Technical Papers. 2006. PP. 69-70.
5. Bueno-Ibarra M.A., Alvarez Borrego J., Acho L., Chavez-Sanchez M.C. Fast autofocus algorithm for automated microscopes // Optical Engineering. 2005. Vol. 44. № 6. P. 063601.
6. Sun Y., Duthaler S. & Nelson B.J. Autofocusing in computer microscopy: Selecting the optimal focus algorithm // Microsc. Res. Tech. 2004. № 65. PP. 139-149.
7. Geusebroek J.M., Cornelissen F., Smeulders A. & Geerts H. Robust autofocus in microscopy // Cytometry. 2000. № 39. PP. 1-9.
8. Santos A., Solorzano C.O., Vaquero J.J., Pena J.M., Malpica N., Pozo F. Evaluation of autofocus functions in molecular cytogenetic analysis // J. Microsc. 1997. № 188. PP. 264-272.
9. Baina J., Dublet J. Automatic Focus and Iris Control for Video Cameras // IEEE Fifth International Conference on Image Processing and Its Applications. 1995. 4-6 July. PP. 232-235.
10. Firestone L., Cook K., Culp K., Talsania N., Preston K. Comparison of autofocus methods for automated microscopy // Cytometry. 1991. № 12. PP. 195-206.
11. Groen F., Young I.T., Lighthart G. A comparison of different focus functions for use in autofocus algorithms // Cytometry. 1985. № 12. PP. 81-91.
12. Беззубик В.В., Белашенков Н.Р., Устинов С.Н. Оптимизация алгоритмов автофокусировки цифрового микроскопа // Оптический журнал. 2009. Vol. 76. № 10. С. 16-22.
13. Жирков В.Ф., Новиков К.В., Сушкова Л.Т. Проблема автоматической фокусировки видеомикроскопа при сканировании цитологических препаратов // Биомедицинская радиоэлектроника. 2000. № 6. С. 55-60.
14. Старченко В.М., Самородов А.В., Спиридонов И.Н. Исследование критериев резкости гемоизображений / Медико-технические технологии на страже здоровья: Сб. докладов VII РНТК, г. Салоники (Греция), 2-9 октября 2005 г. – М., 2005. С. 136-137.

Ольга Александровна Артюхова,
аспирант,

Андрей Владимирович Самородов,
канд. техн. наук, доцент,
кафедра «Биомедицинские
технические системы»,
МГТУ им. Н.Э. Баумана,
г. Москва,

e-mail: olga.artyukhova@mail.ru