

УДК 681.3.07

В.В. Ляшенко¹, О. А. Кобылин², С.Н. Томич³¹ ХНУРЭ, м. Харьков, Украина, lyashenko.vyacheslav@mail.ru² ХНУРЭ, м. Харьков, Украина, oleg.kobylin@gmail.com³ ХНУРЭ, м. Харьков, Украина, stas.tomich@gmail.com

ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ ЦИТОЛОГИЧЕСКИХ ПРЕПАРАТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИДЕОЛОГИИ ВЕЙВЛЕТОВ

В данной работе рассмотрена целесообразность применения идеологии вейвлетов в медицине, а именно для обработки изображений цитологических препаратов. Показаны особенности обработки изображений цитологических препаратов с использованием идеологии вейвлетов. Приведены примеры обработки различных изображений цитологических препаратов.

ВЕЙВЛЕТ АНАЛИЗ, КОНТРАСТИРОВАНИЕ, ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ, ЦИТОЛОГИЧЕСКИЕ ПРЕПАРАТЫ

Введение

Фиксация и анализ изображений различных объектов является одним из направлений познания окружающего нас мира. Такой подход дает возможность исследовать не только изменения, происходящие в реальном мире, но и обнаружить и изучить возможные закономерности таких изменений. Более того, всесторонний и комплексный анализ изображений реальных объектов позволяет исследовать процессы, которые невозможно увидеть при помощи простого человеческого зрения.

Одними из таких направлений применения общей идеологии обработки изображений (анализа и интерпретации данных) является медицина. В качестве образов реальных объектов выступают изображения различных органов, тканей, отдельных частей скелета человека, которые получены при помощи специальных методов их визуализации: магнитно-резонансной томографии [1], позитронно-эмиссионной томографии [2], ультразвукового анализа [3], световой и электронной микроскопии [4, 5].

Среди множества образов реальных объектов, позволяющих исследовать организм человека, особо можно выделить изображения цитологических препаратов. Это связано с тем, что:

с одной стороны, цитологические препараты представляют собой объекты микромира, которые позволяют проводить более углубленные исследования человеческого организма, изучать динамику его функционирования и осуществлять диагностику возможных заболеваний на ранних стадиях их развития;

с другой стороны, это специальные изображения, которые отличаются особенностью визуализации объектов микромира, что обуславливает необходимость использования разнообразных методов обработки изображений с целью получения информации об исследуемых объектах, процессах, явлениях.

В общем случае, идеология обработки изображений цитологических препаратов преследует своей целью идентификацию определенных частей изображения (клетки, ядра клетки) для последующего изучения их изменений (изменение формы клетки, изменение площади клетки) либо подсчета определенных количественных характеристик (количества клеток, количества ядер клеток, площади клеток). Для решения поставленных задач могут быть использованы как методы выделения контуров, так и методы сегментации. В тоже время решение таких задач предполагает использование предварительных методов обработки изображений цитологических препаратов, которые направлены на улучшение качества восприятия и последующей обработки исходного изображения [6, 7]. Это связано с тем, что процедура получения изображений цитологических препаратов использует методику окрашивания рассматриваемых клинических образцов, которая, в конечном счете, является одним из ключевых источников возникновения ошибок при обработке таких изображений, вследствие возникающих различий относительной интенсивности окрашивания отдельных частей цитологического препарата. Однако следует отметить, что простым изменением яркости, контрастности либо одной фильтрацией невозможно качественно решить возникающие задачи в обработке изображений цитологических препаратов. В тоже время практика автоматической обработки изображений цитологических препаратов, как правило, основывается на монохромных изображениях, что вносит свои коррективы в восприятие и анализ соответствующих образов на цитологических препаратах [8, 9]. При этом следует отметить, что существуют различные методы и подходы к обработке и анализу изображений цитологических препаратов, каждый из которых имеет как положительные, так и отрицательные моменты. Поэтому разработка и

реализация новых процедур анализа изображений цитологических препаратов является перспективным направлением исследования, которое будет способствовать нахождению наилучших решений в реализации целей обработки медицинских изображений.

Таким образом, представляется целесообразным рассмотреть процедуру обработки изображений цитологических препаратов с использованием идеологии вейвлетов, которая хорошо себя зарекомендовала в различных областях обработки изображений.

1. Основы идеологии вейвлетов в процедуре обработки изображений

Выбор вейвлет анализа для обработки изображений цитологических препаратов обоснован тем, что вейвлет обработка позволяет учесть особенности рассматриваемых изображений за счет разложения исходных данных на множество аппроксимирующих и детализирующих коэффициентов, в частности при выделении контура, что можно рассматривать в качестве основы исследования таких изображений. Более того, вейвлет анализ изображений позволяет получить дополнительную информацию об исследуемых объектах, что позволяет, в частности, повысить качество анализа изображений цитологических препаратов.

Вейвлет анализ основан на вейвлет преобразовании. Вейвлет-преобразование – это разложение сигнала (в частности некоторого изображения) по системе вейвлетов. Вейвлеты получаются путем сдвига и масштабированием одной функции – порождающего вейвлета [10]. Вейвлетом в таком случае является функция, быстро убывающая на бесконечности, среднее значение которой равно нулю. Если сигнал имеет разрыв, то высокие амплитуды будут только у тех вейвлетов, максимумы которых окажутся вблизи точки разрыва. Это позволяет выделять контур на исследуемом изображении. В тоже время в общем виде под разрывами понимается резкий скачкообразный переход в течение какого-либо процесса. Количественно это можно оценить величиной первой производной такого процесса. Там, где имеют место скачки, первая производная очень велика. Если скачек имеет форму разрыва, то первая производная стремится к бесконечности. Однако, реальные процессы, измеренные физически реальными приборами, не могут иметь идеальных разрывов. В действительности, измеренные фрактальные переходы характеризуются конечным значением производной. Чем резче разрыв, тем больше значение производной. Плавные переходы будут иметь небольшие значения производной. Благодаря этому можно

определить наличие особенностей анализируемого изображения, а также и точку в котором возможные особенности проявляется. Подчеркнуть такие особенности помогает многоуровневое разложение исходного изображения на множество аппроксимирующих и детализирующих коэффициентов.

В основе формализации непрерывного вейвлет-преобразования (НВП) лежит использование двух непрерывных и интегрируемых по всей оси t функций [10, 11]:

– вейвлет – функции $\phi(t)$ с нулевым значением интеграла

$$\int_{-\infty}^{\infty} \phi(t) dt = 0, \quad (1)$$

определяющей детали сигнала и порождающей детализирующие коэффициенты;

– масштабирующая функции $\phi(t)$ с единичным значением интеграла

$$\int_{-\infty}^{\infty} \phi(t) dt = 1, \quad (2)$$

определяющей грубое приближение сигнала и порождающей коэффициенты аппроксимации.

Однако функция НВП применима только для одномерных сигналов, а изображение является двумерным сигналом. Поэтому для возможности применения НВП с целью выделения границ изображения предлагается рассматривать следующую процедуру анализа и выделения контура [12]:

– выполним вычисление горизонтальных разрывов исходного изображения F , представленного в виде матрицы, заданной своими отсчетами $f_{ij} \in \{0, 1, \dots, P\}, i = 1, 2, \dots, N, j = 1, 2, \dots, M$ на квадратной решетке $N \times M$. Для этого используем следующее выражение для получения так называемой матрицы вейвлет-спектрограммы W (исходя из последовательной обработке каждой строки исходного изображения F):

$$W[f_{ij}] = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} f_{ij} \phi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt, \quad (3)$$

где $\phi\left(\frac{t-b}{a}\right)$ – материнский вейвлет, удовлетворяющий условию (1); a, b – масштаб и центр временной локализации, которые определяют масштаб и смещение функции $\phi(t)$ в соответствии с условиями масштабирования (2); $[f_{ij}]$ – обозначает номер обрабатываемой строки исходного изображения F для получения множества значений ее вейвлет-спектрограммы W .

Параметры a, b выбираются таким образом, чтобы соответствующие линейные размеры матрицы вейвлет-спектрограммы W коррелировали с линейными размерами исходного изображения F , но при этом были учтены возможные параметры вейвлет преобразования.

Далее на основе анализа полученной спектрограммы (W , для каждой строки исходного изображения F) выбираем определенную ее строку NN , исходя из условия

$$NN = \max\left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N w_{ij}\right), \quad (4)$$

где w_{ij} – элемент вейвлет-спектрограммы анализируемой строки исходного изображения F .

Такой выбор обусловлен тем, что мы выбираем ту часть спектра строки исходного изображения, которая соответствует наибольшему разрыву исходного сигнала между его отсчетами (смотри замечания сделанные выше).

Выбранная таким образом строка будет соответствовать строке в матрице F_g , которая характеризует матрицу горизонтальных разрывов исходного изображения F .

Обработка всех строк исходного изображения F позволяет в итоге получить матрицу горизонтальных разрывов F_g , благодаря следующей последовательности преобразований:

$$F \xrightarrow{\text{НВП строк}} W \xrightarrow{\text{выбор строки}} F_g.$$

– аналогичным образом производится вычисление вертикальных разрывов исходного изображения F для каждого его столбца. Для этого используется формула (3) и аналогичная формуле (4) формула для выбора определенной строки из полученных вейвлет-спектрограмм для каждого столбца исходного изображения F :

$$MM = \max\left(\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M w_{ij}\right). \quad (5)$$

Обработка всех столбцов исходного изображения F позволяет в итоге получить матрицу вертикальных разрывов F_v , благодаря следующей последовательности преобразований:

$$F \xrightarrow{\text{НВП столбца}} W \xrightarrow{\text{выбор столбца}} F_v.$$

– производится сложение матриц вертикальных и горизонтальных разрывов в одну матрицу, которая и отображает контур исходного изображения на основе метода НВП. Для визуальной наглядности матрицы горизонтальных, вертикальных разрывов, а также обобщенная матрица, отображающая контур исходного изображения могут быть инвертированы.

При этом следует отметить, что построение вейвлет-спектрограммы W во многом определяется размерами исходного изображения и используемым параметром масштаба a при проведении вейвлет преобразования исследуемого изображения.

2. Контрастирование как элемент анализа изображений цитологических препаратов

Как правило, в качестве предварительной процедуры обработки микроскопических изображений в медицине, к которым относятся и изображения цитологических препаратов, выделяют контрастирование [13, 14].

Контрастность – одна из основных характеристик изображения, напрямую связанная с яркостью пикселей, которые являются источниками информации об объектах на изображении. Поэтому изменение контраста изображения позволяет повысить как четкость восприятия изображения, так и точность (эффективность) его последующей обработки. В частности, при увеличении контрастности изображения светлые участки становятся еще светлее, а темные темнее. В результате происходит перераспределение пикселей за счет среднего тонового диапазона. При уменьшении контрастности изображения, наоборот происходит расширение среднего тонового диапазона. Темные пиксели становятся более светлыми, а светлые более темными и частично переходят в средние тона. Таким образом, изменение контраста изображения, и прежде всего увеличение контраста позволяет сделать отдельные детали изображения более различимыми. Это очень важно для микроскопических изображений в медицины. Для контрастирования изображений цитологических препаратов могут быть использованы различные методы, среди которых можно выделить [15]:

- выравнивание гистограммы значений яркости элементов изображения (эквализация),
- нелинейное растяжение динамического диапазона значений яркостей изображения,
- использование различных масок фильтрации,
- нечеткое маскирование.

В дальнейшем мы используем метод выравнивания гистограммы значений яркости элементов изображения, как один из самых простых методов контрастирования изображений. Нашей целью, в первую очередь, является показать влияние контрастирования на эффективность применения идеологии вейвлетов в обработке изображений цитологических препаратов.

3. Тестовые изображения

Для проведения экспериментов мы используем различные изображения цитологических препаратов, которые находятся в открытом доступе интернет.

На рис. 1 представлено изображение цитологического препарата – молочной железы, где показано скопление клеток эпителиальных групп разного типа (с сайта <http://screening.iarc.fr/>). В частности,

желтым цветом выделены опухолевые клетки кожи, расположенные в эпидермисе.

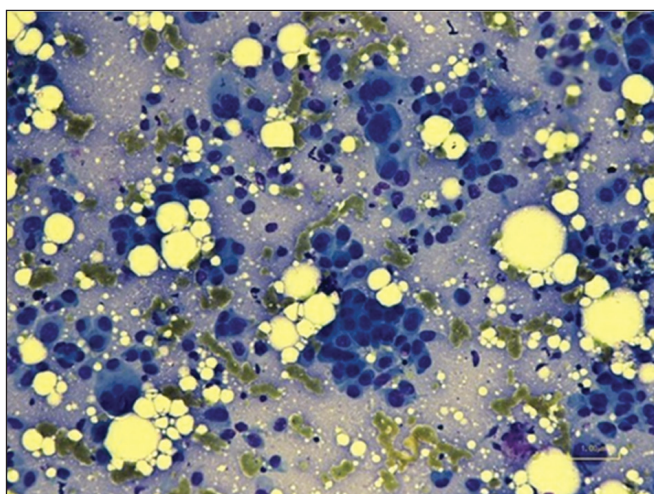


Рис. 1. Цитологический препарат. Молочная железа

На рис. 2 представлено изображение цитологического препарата для диагностики рака щитовидной железы, где синим цветом показаны потенциальные клетки рака (с сайта <http://www.pathologyoutlines.com>).

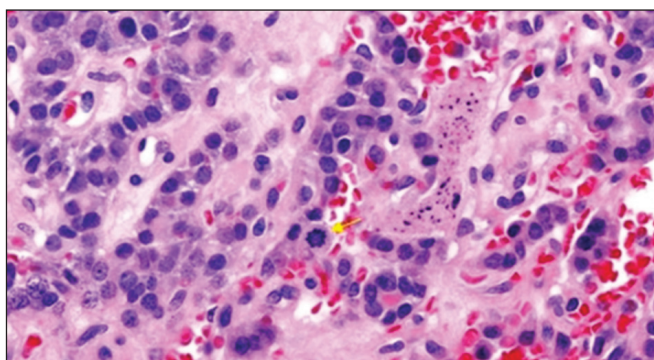


Рис. 2. Цитологический препарат. Щитовидная железа

Представленные изображения цитологических препаратов являются различными по структуре и сложности восприятия, что позволяет оценить возможности применения методологии вейвлет анализа в качестве инструмента их обработки.

4. Эксперименты и обсуждение

Для реализации идеологии вейвлетов с целью обработки и анализа изображений цитологических препаратов мы преобразовываем исходные изображения в полутоновые, а затем контрастируем полутоновые изображения. На рис. 3 представлены результаты преобразования исходного изображения рис. 1 в полутоновое изображение. Результаты контрастирования такого изображения в виде соответствующих гистограмм для исходного полутонового изображения и контрастированного полутонового изображения представлены на рис. 4 (рис. 4, а, рис. 4, б соответственно).

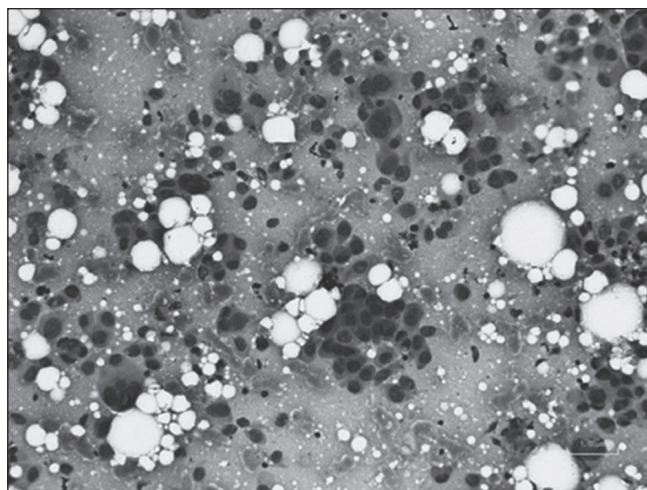
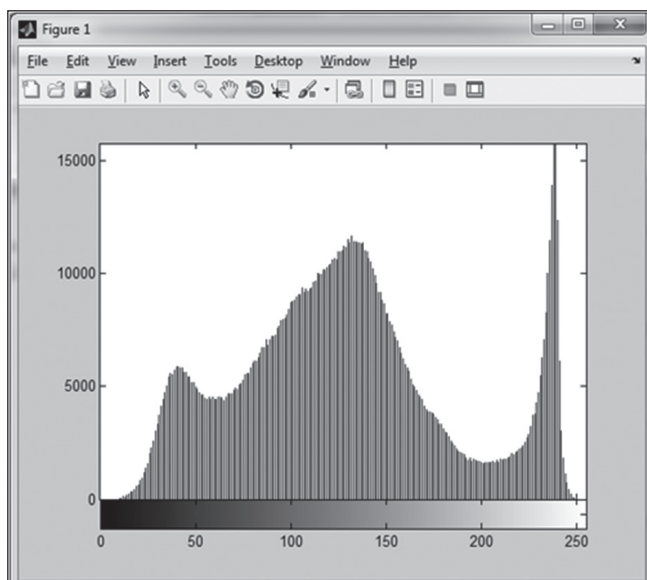
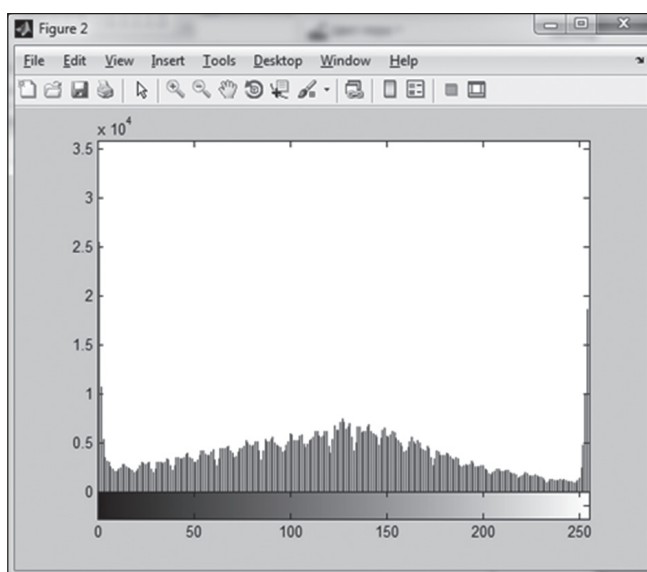


Рис. 3. Полутоновое изображение рис. 1



а



б

Рис. 4. Гистограммы исходного и контрастированного полутонового изображения для рис. 1

На рис. 5 представлены результаты преобразования исходного изображения рис. 2 в полутоновое изображение. Результаты контрастирования такого изображения в виде соответствующих гистограмм для исходного полутонового изображения и контрастированного полутонового изображения представлены на рис. 6 (рис. 6, а, рис. 6, б соответственно).

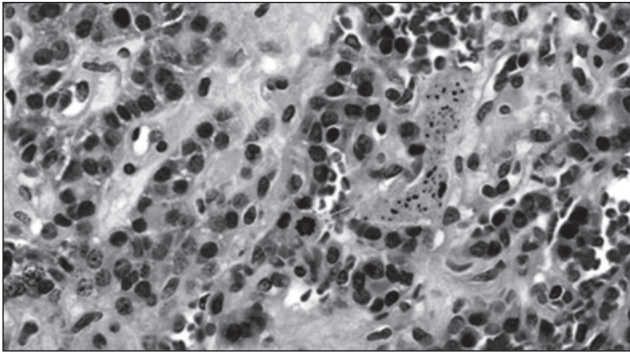
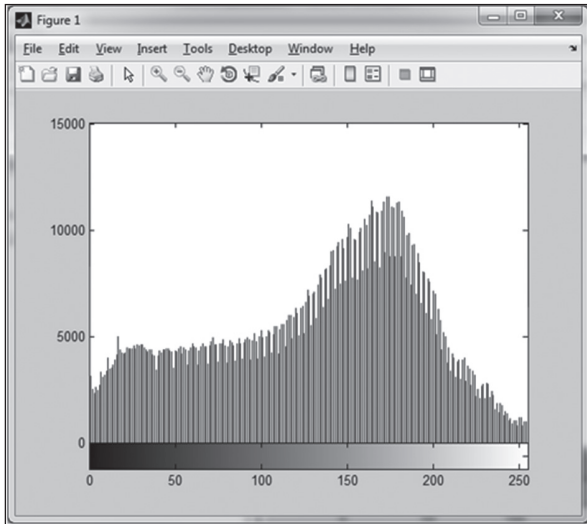
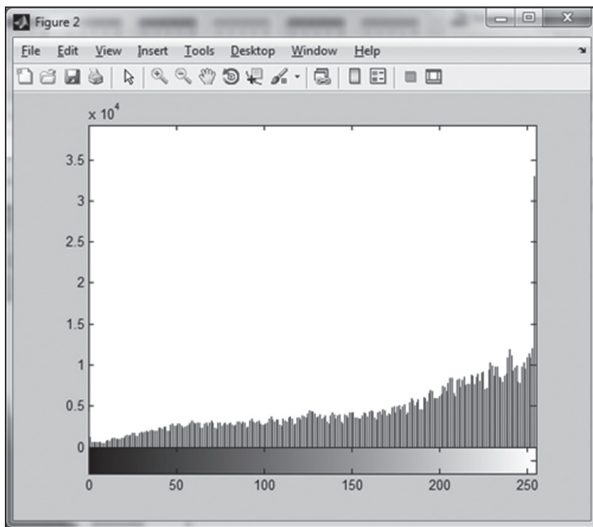


Рис. 5. Полутоновое изображение рис. 2



а

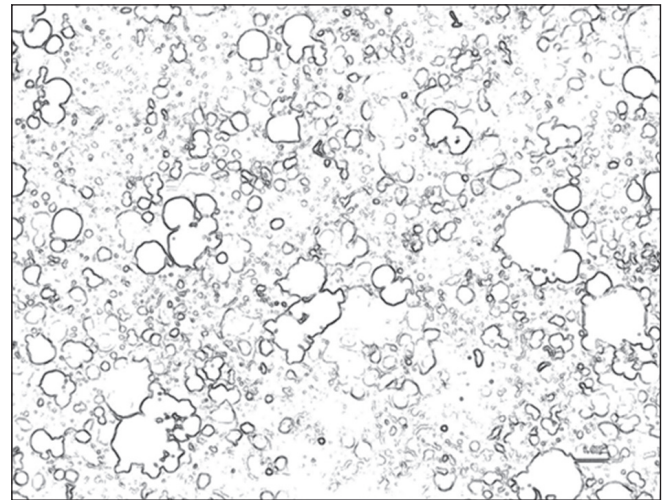


б

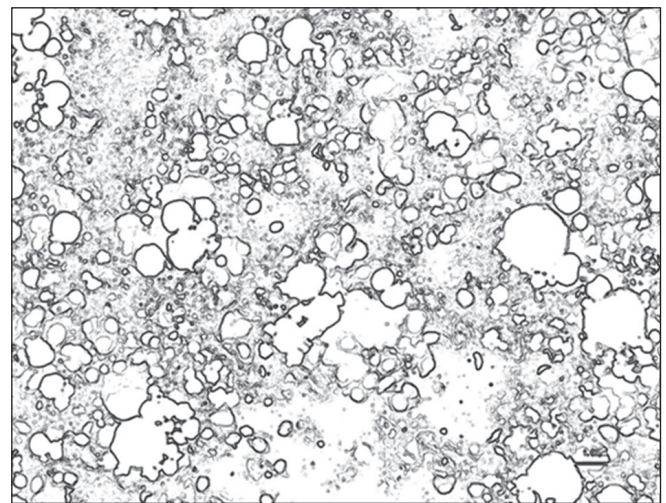
Рис. 6. Гистограммы исходного и контрастированного полутонового изображения для рис. 2

Далее мы применяем идеологию вейвлетов к исходному и контрастированному полутоновым изображениям для анализа изображений цитологических препаратов.

На рис. 7 представлены результаты вейвлет преобразования для изображения рис. 1 (а – обработка исходного полутонового изображения, б – обработка контрастированного полутонового изображения). Для вейвлет преобразования мы используем вейвлет db1.



а



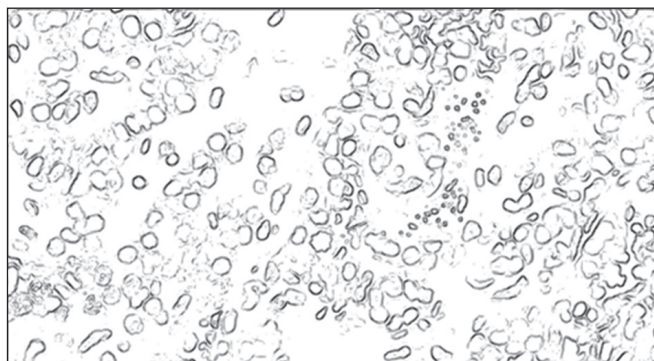
б

Рис. 7. Результаты вейвлет преобразования для изображения 1

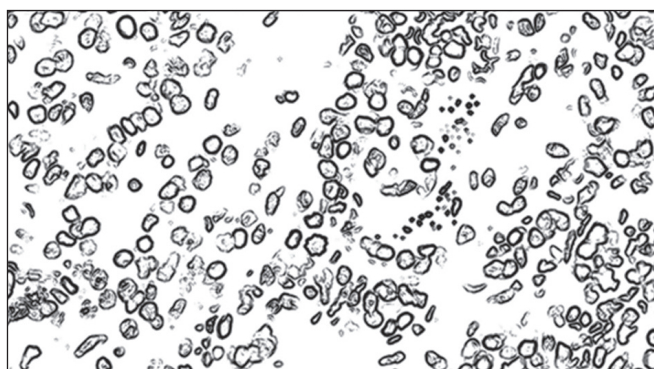
На рис. 8 представлены результаты вейвлет преобразования для изображения рис. 2 (а – обработка исходного полутонового изображения, б – обработка контрастированного полутонового изображения).

Как видно из рис. 7 и рис. 8 процедура предварительного контрастирования исходного изображения позволяет получить более информативные изображения после применения идеологии вейвлетов к изображениям цитологических препаратов.

Прежде всего, используемое вейвлет преобразование позволяет подчеркнуть присущие особенности, представленных на изображениях цитологических препаратов различных объектов, подчеркнуть границы выделения таких объектов. Таким образом, в дальнейшем можно говорить об организации процедуры кластеризации объектов на изображениях цитологических препаратов с использованием идеологии вейвлетов.



а



б

Рис. 8. Результаты вейвлет преобразования для изображения 2

Следует также отметить о появлении множества фоновых точек в результате предварительного контрастирования исходного изображения и последующего применения к таким изображениям процедуры вейвлет преобразования. Для возможной минимизации излишнего количества фоновых точек в результате предварительного контрастирования исходного изображения цитологических препаратов представляется целесообразным выбор метода контрастирования в зависимости от общей сложности и насыщенности объектами исходного изображения цитологических препаратов. В частности для изображения на рис. 9, используемый метод контрастирования – выравнивание гистограммы значений яркости элементов изображения, дает хорошие результаты (рис. 10, а – обработка исходного полутонового изображения, б – обработка контрастированного полутонового изображения).

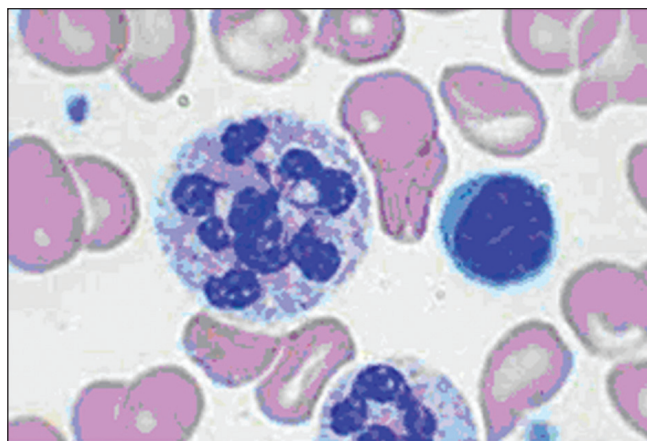
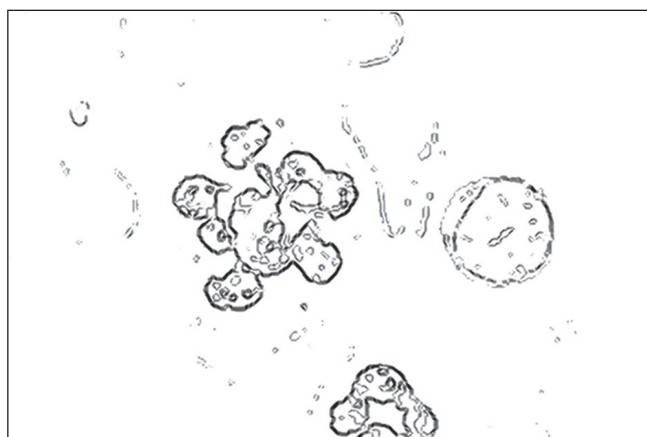
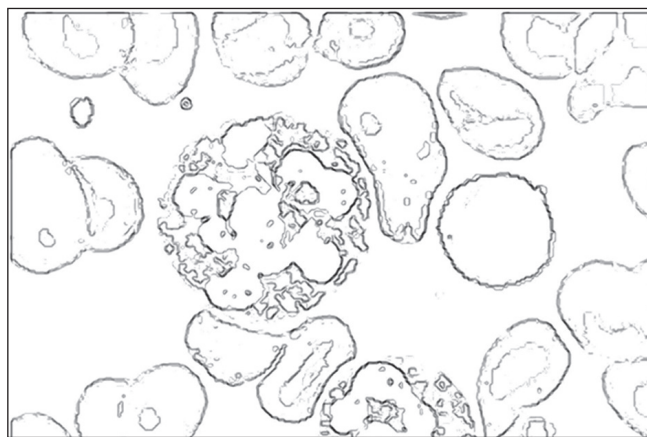


Рис. 9. Цитологический препарат. Клетки крови



а



б

Рис. 10. Результаты вейвлет преобразования для изображения 9

Другим направлением по минимизации множества фоновых точек в результате предварительного контрастирования исходного изображения можно рассматривать процедуру фильтрации, которая направлена на сглаживание незначительных перепадов и удаление небольших объектов на изображении цитологических препаратов. Основой для проведения такой фильтрации является как выбор фильтра определенного типа, так и выбор размера окна для реализации процедуры фильтрации

(определение масштаба используемого фильтра). Определение масштаба используемого фильтра должно коррелировать с размерами информативных объектов на изображении цитологических препаратов. Также важно учитывать и длину волны вейвлета, который используется для преобразования изображений цитологических препаратов. При этом такая длина волны используемого вейвлета и масштаб фильтра для сглаживания незначительных перепадов и удаление небольших объектов на изображении цитологических препаратов в идеале должны коррелировать между собой.

Для повышения эффективности использования идеологии вейвлетов с целью обработки изображений цитологических препаратов также можно использовать полученные результаты для реализации процедуры нечеткого маскирования. Этот вывод основан на сравнении полученных результатов для исходного и контрастированного изображения в соответствии с рис. 7 и рис. 8 и возможностью вычисления существующего несоответствия между результатами вейвлет обработки исходного и контрастированного изображения, где такое несоответствие может быть использовано в качестве элемента усиления в процедуре нечеткого маскирования.

Тем не менее, приведенные результаты показывают возможность и целесообразность применения идеологии вейвлетов для обработки изображений цитологических препаратов. При этом среди основных этапов такой обработки следует выделить: контрастирование, подавление локальных шумов и непосредственное применение вейвлет преобразования.

Выводы

Рассмотрена общая процедура обработки изображений цитологических препаратов на основе использования идеологии вейвлетов. Показаны положительные и отрицательные стороны применения контрастирования изображений цитологических препаратов с целью их дальнейшей обработки при помощи вейвлет преобразования. Проанализированы варианты и пути минимизации возникновения множества фоновых точек в результате предварительного контрастирования исходного изображения для дальнейшей его обработки на основе идеологии вейвлетов. Приведены примеры обработки различных изображений цитологических препаратов с использованием вейвлет преобразования.

Список литературы:

1. Schluter, S. et al. Image processing of multiphase images obtained via X-ray microtomography: a review [Text] S. Schluter et al. //Water Resources Research. – 2014. – Т. 50. – №. 4. – С. 3615–3639.
2. Gaemperli, O. et al. Imaging intraplaque inflammation in carotid atherosclerosis with 11C-PK11195 positron emission tomography/computed tomography [Text] O. Gaemperli et al. //European heart journal. – 2012. – Т. 33. – №. 15. – С. 1902–1910.
3. Sikdar, S. et al. Novel method for predicting dexterous individual finger movements by imaging muscle activity using a wearable ultrasonic system [Text] S. Sikdar et al. //IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering. – 2014. – Т. 22. – №. 1. – С. 69–76.
4. Eklund, A. et al. Medical image processing on the GPU—Past, present and future [Text] A. Eklund et al. //Medical image analysis. – 2013. – Т. 17. – №. 8. – С. 1073–1094.
5. Ciresan, D. et al. Deep neural networks segment neuronal membranes in electron microscopy images [Text] D. Ciresan et al. //Advances in neural information processing systems. – 2012. – С. 2843–2851.
6. Mahendran, G. Automatic segmentation and classification of pap smear cells [Text] G. Mahendran, R. Babu, D. Sivakumar //International Journal of Management, IT and Engineering. – 2014. – Т. 4. – №. 5. – С. 100–108.
7. Singh, S. Identification of components of fibroadenoma in cytology preparations using texture analysis: a morphometric study [Text] S. Singh, R. Gupta //Cytopathology. – 2012. – Т. 23. – №. 3. – С. 187–191.
8. Lyashenko, V. V. Using the methodology of wavelet analysis for processing images of cytology preparations [Text] V. V. Lyashenko, A. M. A. Abdallah Babker, O. A. Kobylin //National Journal of Medical Research. – 2016. – Т. 6. – №. 1. – С. 98–102.
9. Lyashenko, V. V. The methodology of wavelet analysis as a tool for cytology preparations image processing [Text] V. V. Lyashenko, A. M. A. A. Babker, O. A. Kobylin //Cukurova Medical Journal. – 2016. – Т. 41. – №. 3. – С. 453–463.
10. Kingsbury, N. Image processing with complex wavelets [Text] N. Kingsbury //Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. – 1999. – Т. 357. – № 1760. – С. 2543–2560.
11. Heil, C. E. Continuous and discrete wavelet transforms [Text] C. E. Heil, D. F. Walnut //SIAM review. – 1989. – Т. 31. – №. 4. – С. 628–666.
12. Kobylin, O. Comparison of standard image edge detection techniques and of method based on wavelet transform [Text] O. Kobylin, V. Lyashenko //International Journal of Advanced Research. – 2014. – Т. 2. – №. 8. – С. 572–580.
13. Dey, N. et al. Digital analysis of microscopic images in medicine [Text] N. Dey et al. //Journal of Advanced Microscopy Research. – 2015. – Т. 10. – №. 1. – С. 1–13.
14. Lyashenko, V. Contrast Modification as a Tool to Study the Structure of Blood Components [Text] V. Lyashenko, R. Matarneh, O. Kobylin //Journal of Environmental Science, Computer Science and Engineering & Technology. – 2016. – Т. 5. – №. 3. – С. 150–160.
15. Semmlow J. L., Griffel B. Biosignal and medical image processing. [Text] / J. L. Semmlow, B. Griffel – CRC press, 2014.

Поступила в редколлегию 10.11.2016