

Исследование текстурных признаков для задач распознавания клеток костного мозга в информационно-измерительных системах онкогематологии

Валентин Григорьевич Никитаев^{1✉}, Александр Николаевич Проничев², Николай Николаевич Тупицын³, Александра Дмитриевна Палладина⁴, Валентина Викторовна Дмитриева⁵, Александра Вячеславовна Козырева⁶, Михаил Сергеевич Майоров⁷, Михаил Андреевич Соломатин⁸, Екатерина Александровна Дружинина⁹, Евгений Валерьевич Поляков¹⁰, Булат Базаржапович Батуев¹¹

1, 2, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

3, 4 Национальный медицинский исследовательский центр онкологии им. Н. Н. Блохина, Москва, Россия

¹vgnikitayev@mephi.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-4349-3023>

²anpronichev@mephi.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0443-8504>

³nntca@yahoo.com, <https://orcid.org/0000-0003-3966-128X>

⁴palladinaa@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-9400-7347>

⁵vvdmityriyeva@mephi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9202-6691>

⁶kozyreva.sasha@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2727-3802>

⁷mayorov.mikhail.of@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3492-0414>

⁸mis4455@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9929-615X>

⁹kerry1995@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2474-2810>

¹⁰voterstreit@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5346-6504>

¹¹buligarmouth@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-9322-2635>

Аннотация. Изучено влияние параметров построения матрицы пространственной смежности на текстурные признаки в задачах распознавания клеток костного мозга в информационно-измерительных системах диагностики острых лейкозов. Исследовано по 100 изображений бластных клеток В- и Т-клеточных острых лимфобластных лейкозов. Рассмотрено пять рассчитанных на основе матрицы пространственной смежности текстурных признаков – энергия, момент инерции, локальная однородность, максимальная вероятность, энтропия. При построении матрицы смежности проанализированы варьируемые параметры – тип цветового компонента RGB-модели цветного изображения, расстояние и направление смежности. Для заданной выборки изображений диапазон расстояний смежности, в котором наблюдается наибольшее изменение значений текстурных признаков, составил 1–11 пикселей. Значения признаков разных типов изменяются в диапазоне 20–1700 %. Максимальная информативность получена для G-компонента цветного изображения у текстурного признака «локальная однородность» (коэффициент информативности 0,48) с расстоянием смежности 1 пиксель. Для практического применения рекомендовано использовать четыре направления смежности при построении матриц пространственной смежности. Полученные результаты важны специалистам, работающим в области проектирования информационно-измерительных систем онкогематологии (диагностика опасных онкологических заболеваний – острых лейкозов).

Ключевые слова: распознавание образов, обработка изображений, текстурные признаки, матрица пространственной смежности, компьютерная микроскопия, диагностика острых лейкозов

Финансирование: работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ по проекту № 18-29-09115.

Для цитирования: Никитаев В. Г., Проничев А. Н., Тупицын Н. Н., Палладина А. Д., Дмитриева В. В., Козырева А. В., Майоров М. С., Соломатин М. А., Дружинина Е. А., Поляков Е. В., Батуев Б. Б. Исследование текстурных признаков для задач распознавания клеток костного мозга в информационно-измерительных системах онкогематологии // Измерительная техника. 2021. № 10. С. 53–59. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-10-53-59>

The study of texture features for the recognition problems of bone marrow cells in information-measuring systems of oncohematology

Valentin G. Nikitaev^{1✉}, Alexander N. Pronichev², Nikolay N. Tupitsin³, Aleksandra D. Palladina⁴, Valentina V. Dmitrieva⁵, Alexandra V. Kozyreva⁶, Mihail S. Mayorov⁷, Mihail A. Solomatin⁸, Ekaterina A. Druzhinina⁹, Evgeny V. Polyakov¹⁰, Bulat B. Batuev¹¹

1, 2, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

3, 4 N. N. Blokhin National Medical Research Center of Oncology, Moscow, Russia

¹vgnikitayev@mephi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4349-3023>

²anpronichev@mephi.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0443-8504>

³nntca@yahoo.com, <https://orcid.org/0000-0003-3966-128X>

⁴palladinaa@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-9400-7347>

⁵vvdmitriyeva@mephi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9202-6691>

⁶kozyreva.sasha@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2727-3802>

⁷mayorov.mikhail.of@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3492-0414>

⁸mis4455@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9929-615X>

⁹kerry1995@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2474-2810>

¹⁰voterstreit@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5346-6504>

¹¹buligarmouth@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-9322-2635>

Abstract. The influence of the parameters of the construction of the spatial-dependence matrices on textural features in the tasks of recognizing bone marrow cells in information and measurement systems for the diagnosis of acute leukemia is studied. Bone marrow preparations were obtained from patients with B- and T-cell acute lymphoblastic leukemias. 100 images of blast cells of B- and T-types were involved. Five textural features are considered – energy, inertia moment, local uniformity, maximum probability, entropy. The features were calculated on the basis of the spatial dependence matrices. The type of the color components of the RGB color image model, the adjacency distance and the direction of adjacency were analyzed as variable parameters when constructing the specified matrices. For a given sample of images of blast cells of type T and B a range of adjacency distances from 1 to 11 pixels was revealed, in which the greatest change in the values of texture features is observed. For different types of signs the change ranged from 20 % to 1700 %. The maximum information content among the studied texture features was obtained for the G-component of a color image in the texture feature “local uniformity” (information content coefficient 0.48) with an adjacency distance equal to one pixel. For practical application, it is recommended to use four directions of adjacency when constructing spatial adjacency matrices. The obtained results are important for specialists working in the field of designing information and measurement systems of oncohematology (diagnostics of dangerous oncological diseases – acute leukemias).

Keywords: pattern recognition, image processing, textural features, spatial-dependence matrices, computer microscopy, acute leukemia diagnosis

Financial Support: the work was carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research (RFBR) under project no. 18-29-09115.

Введение. В диагностике онкологических заболеваний системы крови важную роль играет визуальный микроскопический анализ мазков крови и препаратов костного мозга. В ходе анализа определяется процентный состав ядерных клеток различных типов (формула крови – при анализе периферической крови, миелограмма – для костного мозга). В случае острых лейкозов субстрат опухоли представляет бластные клетки (незрелые клетки костного мозга). Существует несколько разновидностей острого лейкоза, каждому из них соответствуют бластные клетки разных типов. В частности, для диагностики острого лимфобластного лейкоза необходимо определять линейность бластных клеток В- и Т-клеточных острых лимфобластных лейкозов. Одними из ключевых критериев в выявлении бластных клеток во время визуального микроскопического анализа являются характеристики структуры хроматина ядер клеток. При вербальном (словесном) описании изображений клеток врачи в качестве существенного отличительного признака бластных клеток отмечают нежносетчатую или мелкосетчатую структуру хроматина ядер клеток [1]. Визуальный микроскопический анализ трудоёмок, требует большого напряжения зрения, что порождает ошибки классификации клеток и, как следствие, может приводить к ошибкам диагностики острого лейкоза.

Поэтому необходимо автоматизировать визуальный микроскопический анализ.

Системы обработки изображений широко применяются в медико-биологических исследованиях различных объектов [2]. При решении задачи автоматической классификации изображений клеток крови применяются методы распознавания [3–6]. Классическая структура системы распознавания включает предобработку, описание, классификацию, причём ключевым является описание [7]. При проектировании систем распознавания для описания объектов на цифровых 2D-изображениях (в рассматриваемом случае – клеток костного мозга) применяются различные признаки. Все они основаны на яркости и цвете пикселей (непроизводных элементов цифрового изображения). Широко распространены такие признаки классификации объектов, как характеристики формы, размеров, цвета, контраста, текстуры [8, 9].

При проектировании информационно-измерительных систем диагностики острых лейкозов в описании изображений структуры хроматина ядер клеток целесообразно применять текстурный анализ. Здесь под текстурой понимается пространственно-яркостная организация элементов изображения. Текстура содержит информацию о пространственном распределении тональных вариаций пикселей,

для её описания в [10] предложено использовать ряд текстурных признаков – расчётных характеристик на основе матриц пространственной смежности (МПС) (или матриц совместной встречаемости, или матриц Харалика).

Для распознавания клеток крови и костного мозга в качестве признаков классификации успешно используются некоторые текстурные признаки [11]. Но для клеток разных типов, имеющих сходный внешний вид на микроскопических изображениях, например для бластных клеток В- и Т-типов, результаты автоматической классификации недостаточно точны [12, 13]. Поэтому актуален поиск информативных признаков для повышения точности классификации.

В научной литературе мало внимания уделяется анализу влияния выбора параметров построения МПС (расстояний и направлений смежности) на значения текстурных признаков бластных клеток В- и Т-типов. Обычно применяются МПС для единичного расстояния смежности, а в качестве направлений смежности рассматриваются совместно вертикальные и горизонтальные направления. Не изучено влияние выбора параметров построения МПС на информативность текстурных признаков. Знание этих факторов важно при проектировании информационно-измерительных систем диагностики острых лейкозов.

Цель работы – исследование влияния параметров построения МПС (типа цветовой компоненты цветного изображения, расстояния и направлений смежности) на информативность текстурных признаков при решении задач распознавания бластных клеток В- и Т-типов в информационно-измерительных системах диагностики острых лейкозов.

Материалы и методы. Объектами экспериментального исследования выступали изображения искусственных (изображение чёрно-белых полос (рис. 1, поз. 1) с шириной черной полосы 5 пикселей и белой полосы 15 пикселей) и естественных текстур (изображения ядер бластных клеток Т- и В-типов (рис. 1, соответственно поз. 2, 3)).

Для получения изображений клеток использовали препараты костного мозга, полученные от пациентов с В- и Т-клеточным острым лимфобластным лейкозом. Препараты костного мозга для компьютерной микроскопии были приготовлены в Лаборатории иммунологии гемопоэза Национального медицинского исследовательского центра онкологии им. Н. Н. Блохина. Цифровые изображения получены с помощью цифровой камеры Imperx IPX-4M15T-GCFB (Imperx, США) и биологического светового микроскопа Olympus BX-41 (Olympus, Япония). Цифровые микроскопические изображения клеток на препаратах костного мозга на предметном стекле снимали с применением объектива с масляной иммерсией и кратностью увеличения $100\times$. Формат цифрового изображения 2048×2048 пикселей. Цветовое кодирование выполнялось в RGB (R – красный, G – зелёный, B – синий) цветовой модели, глубина кодирования в каждом из цветовых компонентов – 8 бит.

Информативность текстурных признаков оценивали по выборке цветных цифровых микроскопических изображений ядер бластных клеток Т- и В-типов (по 100 изображений клеток каждого типа). Цифровые изображения обрабатывались

специально разработанной на языке C++ компьютерной программой, в которой отдельно для каждого цветового RGB-компонента с разными значениями расстояния и направлений смежности реализован алгоритм расчёта следующих текстурных признаков – энергии *ASM*, локальной однородности *LUN*, энтропии *ENT*, момента инерции *CON*, максимальной вероятности *MPR*:

$$ASM(d, v) = \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} [P(i, j, d, v)]^2;$$

$$LUN(d, v) = \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} \frac{[P(i, j, d, v)]}{1 + (i - j)^2},$$

$$ENT(d, v) = \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} P(i, j, d, v) \ln[P(i, j, d, v)];$$

$$CON(d, v) = \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} (i - j)^2 P(i, j, d, v);$$

$$MPR(d, v) = \max[P(i, j, d, v)],$$

где $P(i, j, d, v)$ – нормализованная матрица пространственной смежности (индексы i, j элементов матрицы, расстояние d смежности и номер v варианта набора принимают при расчёте направлений смежности); N – число возможных градаций яркости цифрового изображения (для кодированного 8 битами изображения число возможных градаций яркости составляет 256).

Расстояние смежности d – минимальное число шагов, которые необходимо сделать, для того чтобы перейти от первого пиксела в паре смежных пикселей ко второму. Под шагом понимается переход от рассматриваемого пиксела к пикселу, соприкасающемуся с ним по грани либо в одной из вершин квадрата, представляющего пиксел цифрового изображения. Для соприкасающихся пикселей $d=1$.

Возможны разные варианты направлений смежности, в настоящей работе рассматривается три: один смежный пиксел по направлению справа; четыре смежных пиксела по направлениям слева, справа, сверху и снизу (совместно по горизонтали и вертикали); восемь смежных пикселей

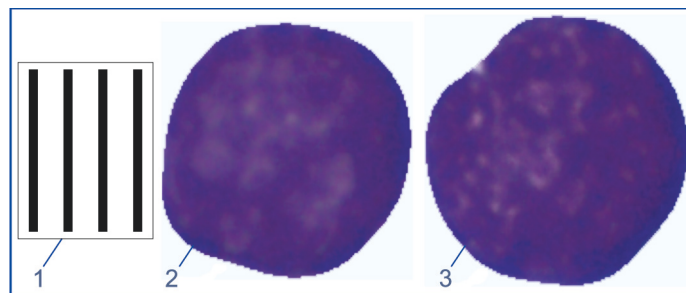


Рис. 1. Пример изображений искусственной текстуры 1 и естественных текстур – ядер бластных клеток Т- и В-типов (соответственно 2, 3)

Fig. 1. An example of artificial (1) and natural textures images (blast cells nuclei of T- and B-type – 2 and 3)

по горизонтали, вертикали и двум диагоналям квадратной окрестности пиксела.

Нормализованная матрица $P(i, j, d, v)$ получается из МПС $H(i, j, d, v)$:

$$P(i, j, d, v) = H(i, j, d, v) \left[\sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} H(i, j, d, v) \right]^{-1}.$$

Нормализация необходима, чтобы текстурные признаки не зависели от размера области исследуемой текстуры.

Элемент МПС $H(i, j, d, v)$ показывает, сколько в изображении имеется пар пикселей, у которых яркости первого и второго пиксела пары равны i, j соответственно, при этом пиксели находятся на расстоянии смежности d , а направления смежности представлены набором вариантов под номером v .

С точки зрения точности классификации клеток по типам важно не абсолютное значение текстурной характеристики клетки, а в какой степени это значение для клеток одного типа отличается от его значения для клеток другого типа. Для оценки такого различия в настоящей работе использовали коэффициент информативности текстурного признака:

$$K = |M_1 - M_2| [1,6(S_1 + S_2)]^{-1},$$

где M_1, M_2 – средние значения текстурного признака для изображений клеток первого и второго типов соответственно; S_1, S_2 – средние квадратические отклонения (СКО) текстурных характеристик клеток двух типов.

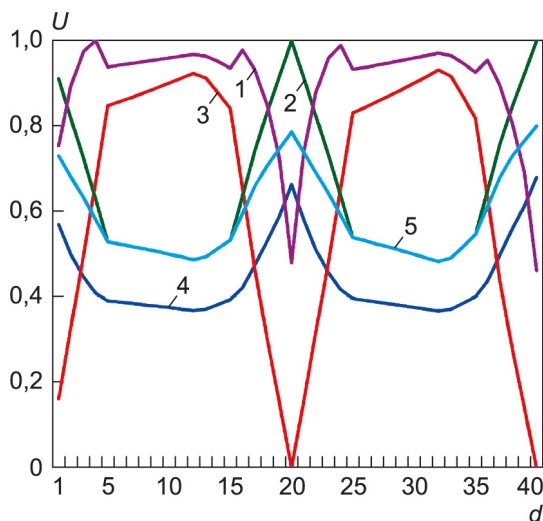


Рис. 2. Зависимости нормализованных значений U текстурных характеристик с направлением смежности «справа» для R-компоненты цифрового изображения с искусственной текстурой от расстояния смежности d :

1 – энтропия; 2 – локальная однородность; 3 – максимальная вероятность; 4 – момент инерции; 5 – энергия

Fig. 2. The normalized value of the texture characteristics dependences U with the "right" adjacency direction for the red component of a digital image with artificial texture on the adjacency distance d :

1 – entropy; 2 – local homogeneity; 3 – maximum probability; 4 – moment of inertia; 5 – energy

Целесообразность применения такого показателя информативности обусловлена опытом кафедры компьютерных медицинских систем Национального исследовательского ядерного университета МИФИ и Лаборатории иммунологии гемопоэза Национального медицинского исследовательского центра онкологии им. Н. Н. Блохина при решении практических задач автоматизации диагностики острых лейкозов.

Экспериментальные исследования. Цель эксперимента – практическое исследование текстурных признаков на изображениях с искусственной и естественной текстурами. Целесообразность выбора искусственной текстуры с однотипными структурными элементами простой формы (однотонные линии на однотонном фоне) объясняется необходимостью выявить зависимость текстурных признаков от соотношения размеров структурных элементов изображения и параметра (расстояния смежности), использованного при построении МПС.

Методика проведения эксперимента состоит из трёх этапов: формирование выборки изображений для программной обработки; компьютерная обработка изображений; анализ результатов компьютерной обработки с практическими рекомендациями по выбору признаков для системы классификации В- и Т-бластных клеток костного мозга при диагностике острых лейкозов.

Формирование выборки изображений для программной обработки зависит от типа текстуры – естественной или искусственной. Для искусственной текстуры выборка изображений представлена изображением вертикальных черно-белых полос (см. рис. 1, поз. 1). Для естественных текстур выборка включает по 100 изображений ядер Т-бластных и В-бластных клеток (см. рис. 1, поз. 2, 3 соответственно). Перед вычислением МПС выполняется предварительная обработка микроскопических изображений препаратов костного мозга с целью выделения ядра клетки, чтобы обеспечить вычисление МПС только для внутренней области ядра.

Компьютерная обработка изображения из подготовленной выборки выполняется по следующему алгоритму. В программе для каждого цифрового цветного изображения формируется три полутоновых изображения (в градациях серого) для RGB цветовых компонентов. Для каждого изображения компоненты формируется МПС с разными расстояниями и направлениями смежности (по трём вариантам направлений смежности). Затем по приведённым выше формулам рассчитываются текстурные признаки.

Анализ результатов компьютерной обработки зависит от типа исследуемых текстур. Для изображения искусственной текстуры строится график зависимости пяти исследуемых текстурных признаков (энергии, энтропии, локальной однородности, максимальной вероятности, момента инерции) от расстояния смежности в диапазоне 1–40 пикселей для R-компонента изображения и одного направления смежности (справа). Другие направления смежности здесь не рассматриваются, так как в них не изменяются яркость и текстурные признаки (с изменением расстояния смежности). Поскольку изображение чёрно-белое, то для G- и B-компонентов результаты анализа такие же, как для R-компонента. По графикам оценивается область изменений признаков в зависимости

от расстояния смежности и соотносится с периодом структурных элементов и их размером на изображении искусственной текстуры.

Для изображений естественных текстур отдельно в каждой из выборок по 100 изображений бластных клеток В- и Т-типов рассчитываются средние значения и СКО текстурных признаков. Строятся графики зависимости средних значений исследуемых пяти текстурных признаков от расстояния смежности в диапазоне 1–40 пикселей для RGB-компонентов изображений и трёх вариантов направлений смежности. На основе средних значений и СКО текстурных признаков определяется коэффициент информативности и строятся графики зависимости коэффициента информативности текстурных признаков от расстояния смежности для каждой из цветовых RGB-компонентов и трёх вариантов направлений смежности. Анализируется влияние параметров МПС (типа цветового компонента, расстояния и направлений смежности) на информативность текстурных признаков при распознавании бластных клеток В- и Т-типов в информационно-измерительных системах диагностики острых лейкозов. Определяются следующие показатели текстурного анализа: наибольшая информативность текстурных признаков в задаче разделения бластных клеток на В- и Т-типы; цветовой компонент, при котором информативность текстурных признаков наибольшая. Затем оцениваются локальные максимумы информативности текстурных признаков.

По полученным данным можно выбирать признаки классификации в информационно-измерительных системах диагностики острых лейкозов.

Анализ результатов. На рис. 2 представлен график зависимости текстурных характеристик (нормализованного значения U) изображения с искусственной текстурой с направлением смежности «справа» для R-компонента от расстояния смежности d . Для изображения с искусственной текстурой при расстояниях смежности, кратных 20 пикселям, на графиках наблюдаются локальные экстремумы, что указывает на периодичность расположения структурных элементов искусственной текстуры. Резкое изменение значений признаков в диапазонах расстояний смежности 1–5, 15–20, 21–25 и т. д. отражает характерный размер текстурного элемента изображения – ширину черной линии 5 пикселей.

Для естественных текстур, соответствующих реальным изображениям ядер бластных клеток Т- и В-типов, при изменении расстояния смежности в начале графика $U(d)$ наблюдается резкое изменение признака, затем изменения становятся меньше, но нет локальных экстремумов, т. е. отсутствуют периодически расположенные структурные элементы (рис. 3). Следует отметить, что значения текстурных признаков для клеток Т- и В-типов различны, но в масштабе рис. 3 соответствующие линии сливаются (за исключением 4, 5 для признака «момент инерции»). Самое резкое изменение признаков отмечается в диапазоне расстояний смежности 1–11 пикселей. Для признаков разных типов изменение составило 20–1700 %. Перелом в тенденции зависимости $U(d)$ наблюдается в области $d=5\dots 11$ пикселей. Следовательно, можно считать, что статистически значимый

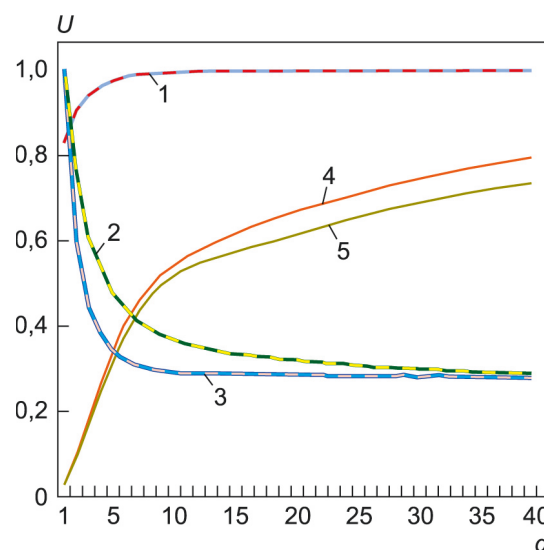


Рис. 3. Зависимости нормализованных средних значений текстурных характеристик от расстояния смежности при четырёх направлениях смежности для R-компоненты изображений с естественной текстурой – ядер бластных клеток Т- и В-типов для текстурных признаков: 1 – энтропия; 2 – локальная однородность; 3 – максимальная вероятность и энергия; 4, 5 – момент инерции для Т- и В-типов клеток соответственно

Fig. 3. The dependences of normalized average values of texture characteristics on the adjacency distance at four adjacency directions for the red component of images with a natural texture – the nuclei of blast cells of T- and B-types for indicate textural features: 1 – entropy; 2 – local uniformity; 3 – maximum probability and energy; 4, 5 – moment of inertia for T- and B-cell types

характерный пространственный размер текстурных элементов на изображении структуры хроматина ядер бластных клеток В- и Т-типов не превышает 11 пикселей.

Анализ коэффициентов информативности текстурных признаков для RGB цветовых компонентов цифровых изображений ядер бластных клеток показал, что для каждого компонента среди всех рассмотренных текстурных признаков максимальное значение имеет локальная однородность, при этом для G-компонента максимум достигается при четырёх направлениях смежности и $d=1$ пиксел ($K=0,48$), для В-компонента – при восьми направлениях смежности и $d=1$ пиксел ($K=0,47$), для R-компоненты – для четырёх направлений смежности и $d=11$ пикселей ($K=0,43$). На рис. 4 представлена зависимость коэффициента информативности текстурного признака «локальная однородность» от расстояния смежности для трёх цветовых компонентов и трёх направлений смежности.

Анализ влияния на текстурные признаки выбора типа направлений смежности показывает, что для R- и G-компонентов максимальные значения коэффициента информативности достигаются при расчёте МПС для четырёх направлений смежности. Для В-компонента максимальный коэффициент информативности наблюдается для восьми направлений смежности, превышая этот показатель для четырёх направлений смежности на 1,3 %, а для одного направления смежности на 11 %. Если рассматривать отдельно произвольный текстурный признак,

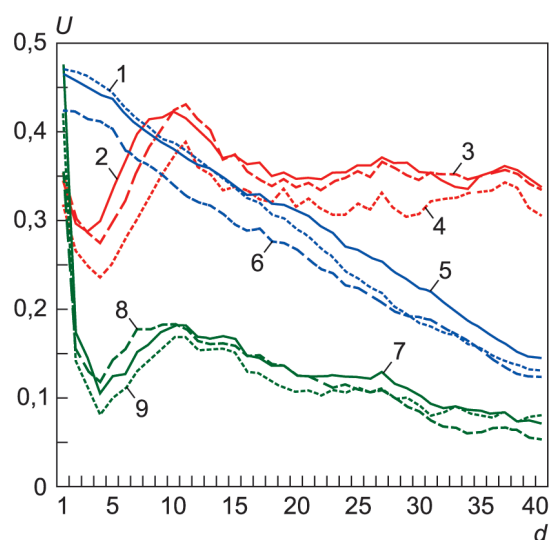


Рис. 4. Зависимость коэффициента K информативности текстурного признака «локальная однородность» от расстояния смежности d для RGB цветовых компонентов и разного количества направлений смежности – одного (4, 6, 9), четырёх (3, 5, 7) и восьми (1, 2, 8)

Fig. 4. The dependence of the coefficient K of the information content of the texture feature "local uniformity" on the adjacency distance d for RGB color components and a different number of adjacency directions – one (4, 6, 9), four (3, 5, 7) and eight (1, 2, 8)

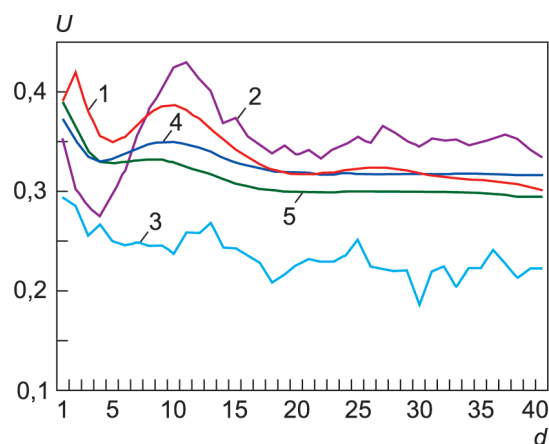


Рис. 5. Зависимость коэффициента K информативности текстурных признаков для R-компонента при четырёх направлениях смежности: 1–5 – те же, что на рис. 2

Fig. 5. The dependence of the coefficient K of the information content of texture features for the R-component with four directions of adjacency: 1–5 – the same as in fig. 2

то его коэффициенты информативности для разных направлений смежности изменяются аналогично в зависимости от расстояния смежности. При этом коэффициент информативности для одного направления смежности как правило меньше аналогичных показателей для четырёх и восьми направлений. Учитывая незначительные различия коэффициентов информативности при восьми и четырёх направлениях смежности, а также меньшие вычислительные затраты при четырёх направлениях смежности можно рекомендовать при расчёте МПС использовать четыре направления смежности.

Коэффициент информативности текстурного признака «локальная однородность» для R-компонента (см. рис. 4) достигает абсолютного максимума при $d=11$ пикселей для четырёх направлений смежности. Для G-компонента этого же текстурного признака абсолютный максимум достигается при $d=1$ пиксел, а при $d=11$ пикселей наблюдается локальный максимум. На рис. 5 представлена зависимость коэффициента информативности текстурных признаков для R-компонента при четырёх направлениях смежности. Для $d=1..7$ пикселей максимальным будет коэффициент информативности текстурного признака «момент инерции» ($K=0,35-0,43$). Следует отметить, что для текстурных признаков «момент инерции», «энергия», «энтропия» наблюдаются локальные максимумы для расстояний смежности 10, 10 и 8 пикселей соответственно.

Анализ графиков на рис. 4, 5 свидетельствует о том, что пространственные взаимоотношения элементов изображений ядер бластных клеток на расстояниях 8–11 пикселей значимы для разделения клеток на В- и Т-типы. Этот вывод коррелируется и с итогом анализа зависимостей на рис. 2 – характерный средний размер текстурного элемента на изображениях бластных клеток не превышает 11 пикселей.

Анализ зависимости исследованных текстурных характеристик изображений структуры хроматина бластных клеток В- и Т-типов от расстояния смежности выявил следующие особенности:

наибольшая информативность среди исследованных текстурных признаков в задачах распознавания бластных клеток В- и Т-типов в препаратах костного мозга наблюдается для признака «локальная однородность» для G-компонента цветного изображения ($K=0,48$);

большинство текстурных признаков цифрового изображения с одинаковыми расстояниями смежности более информативно для R-компонента по сравнению с G- и В-компонентами (исключение составляет признак «локальная однородность», более информативный для указанных компонент при $d=1$ пиксел и $d=1..8$ пикселей соответственно);

коэффициенты информативности большинства рассматриваемых текстурных признаков имеют тенденцию уменьшения с увеличением расстояния смежности (при наличии локальных максимумов). Исключение составляют два случая. Первый – коэффициент информативности признака локальной однородности R-компонента сначала уменьшается, потом увеличивается, достигая абсолютного максимума при расстоянии смежности 11 пикселей ($K=0,43$). Второй случай – для всех текстурных характеристик В-компонента, за исключением локальной однородности, вначале наблюдается увеличение с достижением абсолютного максимума при расстоянии смежности в диапазоне 6–11 пикселей ($K=0,2-0,3$).

Результаты анализа влияния параметров МПС (расстояния и направлений смежности) на информативность текстурных признаков могут служить основой для формирования оптимального набора текстурных признаков при разработке моделей распознавания бластных клеток В- и Т-типов в информационно-измерительных системах диагностики острых лейкозов.

Заключение. По результатам проведенных исследований выявлено, что информативность признаков существенно зависит от расстояния смежности и достигает максимума при разных расстояниях смежности для разных цветовых компонент. Локальные максимумы в зависимости информативности признаков от расстояния смежности связаны с характерными размерами текстурных элементов исследуемых объектов. Характерный средний размер текстурных элементов на цифровых микроскопических изображениях ядер бластных клеток костного мозга В- и Т-типов составляет 11 пикселей. Цветовые компоненты R, G, B по-разному влияют на информативность признаков, и каждый цветовой компонент вносит отдельный вклад в решение задачи распознавания объектов на цветных изображениях.

Полученные в работе результаты могут быть полезны при проектировании современных и перспективных информационно-измерительных систем онкогематологии.

Список источников

1. Гематология: руководство для врачей / Под ред. Н. Н. Мамаева. СПб.: СпецЛит, 2019. 639 с.
2. Самородов А. В. Биотехнические системы автоматизированной микроскопии цитологических препаратов // Медицинская техника. 2018. № 6. С. 17–19.
3. Sahlol A. T., Kollmannsberger P., Ewees A. A., *Scientific Reports*, 2020, vol. 10, no. 1, pp. 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-59215-9>
4. Kutlu H., Avci E., Ozyurt F., *Medical hypotheses*, 2020, vol. 135, 109472. <https://doi.org/10.1016/j.mehy.2019.109472>
5. Черных Е. М., Михеев В. М. Компьютерная система классификации лейкоцитов на изображениях клеток крови // Научный результат. Информационные технологии. 2019. Т. 4. № 3. С. 38–47.
6. Amin M., Kermani S., Talebi A., Oghli M., Recognition of acute lymphoblastic leukemia cells in microscopic images using k-means clustering and support vector machine classifier, *Journal of Medical Signals & Sensors*, 2015, vol. 5, no. 1, pp. 49–58.
7. Никитаев В. Г. Высокотехнологичные информационно-измерительные комплексы онкологической диагностики: проблемы и ключевые положения методологии построения // Измерительная техника. 2015. № 2. С. 68–70.
8. Прэтт У. Цифровая обработка изображений: Пер. с англ. М.: Мир, 1982. Кн. 2. 480 с.
9. Пантелеев В. Г., Слаев В. А., Чуновкина А. Г. Метрологическое обеспечение анализаторов изображений. // Измерительная техника. 2008. № 1. С. 67–71.
10. Haralick R. M., *Proceedings of the IEEE*, 1979, vol. 67, no. 5, pp. 786–804. <https://doi.org/10.1109/PROC.1979.11328>
11. Дмитриева В. В., Тулицын Н. Н., Поляков Е. В., Самсонова А. Д. Исследование эффективности классификации изображений клеток костного мозга в компьютерных системах диагностики острых лейкозов и минимальной остаточной

болезни // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2020. Т. 8. № 3. С. 1–9.

12. Никитаев В. Г., Тулицын Н. Н., Проничев А. Н., Поляков Е. В., Дмитриева В. В., Чернышева О. А., Серебрякова И. Н., Палладина А. Д. Технологии искусственного интеллекта в диагностике острых лимфобластных лейкозов и минимальной остаточной болезни // Медицинская техника. 2020. № 5. С. 42–44.

13. Nikitaev V. G., Pronichev A. N., Polyakov E. V., Chernysheva O. A., Serebryakova I. N., Tupitsyn N. N., *Procedia Computer Science*, 2020, vol. 169, pp. 353–358. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.02.229>

References

1. *Gematologiya: rukovodstvo dlia vrachei*, ed. N. N. Mamaev, St. Petersburg, SpetsLit. Publ., 2019, 639 p. (In Russ.)
2. Samorodov A. V., *Biomedical Engineering*, 2019, vol. 52, no. 6, pp. 387–390. <https://doi.org/10.1007/s10527-019-09853-9>
3. Sahlol A. T., Kollmannsberger P., Ewees A. A., *Scientific Reports*, 2020, vol. 10, no. 1, pp. 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-59215-9>
4. Kutlu H., Avci E., Ozyurt F., *Medical hypotheses*, 2020, vol. 135, 109472. <https://doi.org/10.1016/j.mehy.2019.109472>
5. Chernykh E. M., Mihelev V. M., Komp'yuternaya sistema klassifikatsii leykocitov na izobrazheniyah kletok krovi, *Nauchnyy rezultat. Informatsionnye tekhnologii*, 2019, vol. 4, no. 3, pp. 38–47. (In Russ.)
6. Amin M., Kermani S., Talebi A., Oghli M., Recognition of acute lymphoblastic leukemia cells in microscopic images using k-means clustering and support vector machine classifier, *Journal of Medical Signals & Sensors*, 2015, vol. 5, no. 1, pp. 49–58.
7. Nikitaev V. G., *Measurement Techniques*, 2015, vol. 58, no. 2, pp. 214–218. <https://doi.org/10.1007/s11018-015-0688-0>
8. Pratt W., *Digital image processing: book 2*, Hoboken, Wiley, 1982, 480 p.
9. Panteleev V. G., Slaev V. A., Chunovkina A. G., *Measurement Techniques*, 2008, vol. 51, no. 1, pp. 107–112. <https://doi.org/10.1007/s11018-008-0019-9>
10. Haralick R. M., *Proceedings of the IEEE*, 1979, vol. 67, no. 5, pp. 786–804. <https://doi.org/10.1109/PROC.1979.11328>
11. Dmitriyeva V. V., Tupitsyn N. N., Polyakov Ye. V., Samsonova A. D., Issledovaniye effektivnosti klassifikatsii izobrazheniy kletok kostnogo mozga v komp'yuternykh sistemakh diagnostiki ostrykh leykozov i minimal'noy ostatochnoy bolezni, *Modelirovaniye, optimizatsiya i informatsionnyye tekhnologii*, 2020, vol. 8, no. 3, pp. 1–9. (In Russ.)
12. Nikitaev V. G., Tupitsyn N. N., Pronichev A. N., Serebryakova I. N., Palladina A. D., *Biomedical Engineering*, 2021, vol. 54, no. 5, pp. 354–356. <https://doi.org/10.1007/s10527-021-10038-6>
13. Nikitaev V. G., Pronichev A. N., Polyakov E. V., Chernysheva O. A., Serebryakova I. N., Tupitsyn N. N., *Procedia Computer Science*, 2020, vol. 169, pp. 353–358. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.02.229>

Статья поступила в редакцию 25.08.2021; одобрена после рецензирования 15.09.2021; принята к публикации 22.09.2021.
The article was submitted 25.08.2021; approved after reviewing 15.09.2021; accepted for publication 22.09.2021.