

ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ РАССТАНОВКИ КОАГУЛЯТОВ НА ИЗОБРАЖЕНИЕ ГЛАЗНОГО ДНА

А.С. Широканев^{1,2}, Д.В. Кириш^{1,2}, Н.Ю. Ильясова^{1,2}, А.В. Куприянов^{1,2}

¹ Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева,
443086, Россия, Самарская область, г. Самара, ул. Московское шоссе, д. 34,

² ИСОИ РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН,
443001, Россия, Самарская область, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 151

Аннотация

Диабетическая ретинопатия – одно из часто встречающихся осложнений сахарного диабета, приводящая к тяжёлым последствиям, в том числе к быстрому и необратимому снижению зрения. Для лечения диабетической ретинопатии активно используется процедура лазерной коагуляции, заключающаяся в нанесении серии микроожогов на глазное дно с целью устранения макулярного отёка.

Существующие в настоящее время программные пакеты ориентированы, в первую очередь, на использование заданного шаблона (паттерна) для расстановки коагулятов. Следствием применения шаблонов становится неравномерность расстановки коагулятов по причине высокой вариабельности форм отёка и сосудистого русла. Решение данной проблемы напрямую связано с решением задачи плотной упаковки шаров (для случая двумерного изображения – кругов) в заданную область интереса. Поскольку одним из основных требований специалистов к процедуре лазерной коагуляции является скорость её проведения, то разрабатываемые алгоритмы должны по возможности обладать низкой вычислительной сложностью. Указанное требование полностью игнорируется существующими подходами к решению рассматриваемой проблемы, в связи с чем разработка новых высокопроизводительных алгоритмов расстановки коагулятов является актуальной задачей.

В настоящей работе представлены 7 разработанных алгоритмов расстановки коагулятов, а также приведён детальный анализ ключевых характеристик разработанных методов расстановки коагулятов. Рассмотренные характеристики позволили извлечь информацию о свойствах алгоритмов. Регулярность определяется медианой, асимметрией и эксцессом; детерминированность – дисперсией и средним.

Ключевые слова: обработка изображений, плотная упаковка шаров, лазерная коагуляция, глазное дно, плотная упаковка шаров, диабетическая ретинопатия, итерационный процесс, бинарное изображение, гистограмма распределения.

Цитирование: Широканев, А.С. Исследование алгоритмов расстановки коагулятов на изображение глазного дна / А.С. Широканев, Д.В. Кириш, Н.Ю. Ильясова, А.В. Куприянов // Компьютерная оптика. – 2018. – Т. 42, № 4. – С. 712-721. – DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-4-712-721.

Введение

Причиной многочисленных заболеваний глаза является прогрессирование такого эндокринного заболевания, как сахарный диабет. Одним из часто встречающихся осложнений сахарного диабета является диабетическая ретинопатия (ДРП) [1–3]. При ДРП поражаются все отделы сетчатки глаза, но именно изменения в центральных отделах в виде диабетического макулярного отёка приводят к наиболее быстрому и необратимому снижению зрения [4, 5]. Другим опасным последствием ДРП является отслоение сетчатки. По причине кровоизлияний разрастающихся капилляров структура сетчатки значительно изменяется, вследствие чего сетчатка может растягиваться и отделяться от задней части глаза [4, 6–8]. Точная и ранняя диагностика совместно с эффективным лечением может предотвратить слепоту более чем в 50 % случаев.

Терапия диабетического макулярного отёка представляет собой сложный процесс, включающий в себя как консервативные, так и хирургические лазерные методики. Главным инструментом лечения диабетического макулярного отёка на сегодняшний день яв-

ляется лазеркоагуляция макулярной зоны сетчатки [1, 9]. Процедура лазерного лечения представляет собой нанесение серии дозированных микроожогов – лазеркоагулятов в зоне отёка на сетчатку. Наложение коагулятов происходит либо по одному, либо серийой коагулятов [1, 10], расположенных в виде заданной фигуры правильной формы – паттерна, либо с предварительным планированием расположения коагулятов и последующим наложением полученного плана на изображение сетчатки в режиме реального времени (рис. 1).

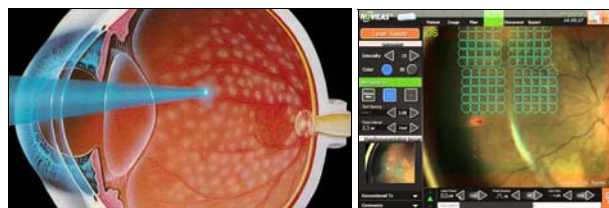


Рис. 1. Примеры паттернов программного средства NAVILAS

Наиболее предпочтительно равномерное расположение коагулятов, когда они находятся на макси-

мально равных расстояниях друг от друга в зоне отёка с учётом исключения попадания их на сосуды. Нанесение коагулятов с предварительным планированием производится под контролем автоматической системы позиционирования луча лазера, что позволяет осуществлять лечение с высокой точностью. Основная проблема процедуры коагуляции заключается в необходимости ручного задания карты коагулятов. Указанный недостаток негативно влияет на качество проводимой терапии вследствие неоптимальности расстановки коагулятов или даже случайного попадания в запретную область глазного дна (зоны макулы). Причиной тому может быть как неопытность врача, так и физическая невозможность зафиксировать глазное яблоко пациента во время процедуры. Кроме того, ручная расстановка коагулятов значительно увеличивает длительность проведения операции.

Существующие в настоящее время программные пакеты ориентированы, в первую очередь, на использование заданного шаблона (паттерна) для расстановки коагулятов [9–12]. В результате, качество заполнения коагулятами области отёка приносится в жертву скорости выполнения операции. Следствием применения шаблонов становится неравномерность расстановки коагулятов. Таким образом, задача разработки алгоритма оптимальной расстановки коагулятов при условии минимального времени выполнения до сих пор является актуальной.

1. Задача плотной упаковки шаров

Процедура нанесения серии коагулятов на глазное дно ограничена следующими условиями:

- 1) коагулят не должен попадать в области макулы, толстых сосудов и здоровых участков;
- 2) зона коагуляции должна охватить максимальную площадь области экссудатов;
- 3) области коагулятов не должны перекрываться, чтобы доза микроожогов не была превышена.

Требования 1 и 3 обеспечивают безопасное проведение процедуры лазерной коагуляции. Выполнение требования 2 гарантирует проведение терапии с максимальной эффективностью.

Для обеспечения оптимальной расстановки коагулятов предлагается двухэтапный подход: на первом этапе выделяется зона с экссудатами (зона с заболеванием, содержащая зону макулярного отёка) в соответствии с требованием 1 [11]; на втором этапе коагуляты расставляются в соответствии с требованиями 2 и 3. На практике выделить область с экссудатами, исключая сосуды и зону макулы, не составляет проблем. Трудности возникают при ручной расстановке коагулятов с выполнением требования 2, поэтому для данного этапа становится особенно важна автоматизация для обеспечения гарантии безопасности проведения процедуры лазерной коагуляции, а также уменьшения времени проведения операции.

Большинство существующих методов решения задачи плотной упаковки шаров предназначены для областей фиксированной формы [12–15]. С другой сто-

роны, методы, ориентированные на произвольную область, обладают чрезмерной вычислительной сложностью [16–18], из-за чего время проведения процедуры выходит за допустимые пределы.

Вследствие этого основная цель исследований заключается в разработке алгоритмов решения задачи плотной упаковки шаров, которые удовлетворяют требованиям оптимальности заполнения шарами заданной области и допустимого времени выполнения. В качестве критериев качества работы алгоритма рассматривались: среднее, дисперсия, асимметрия, медиана, эксцесс и количество упакованных шаров.

2. Алгоритм поиска потенциальных центров шаров

Для решения задачи плотной упаковки шаров предлагается предварительно выделить потенциальные центры шаров, то есть исключить из заданной области точки, которые в принципе не могут соответствовать центрам шаров. Пусть задано двумерное бинарное изображение f_{ij} , где $f_{ij} = 1$, если $(i, j) \in Q$ и $f_{ij} = 0$, если $(i, j) \notin Q$, где Q – заданная область с экссудатами, которая либо задаётся вручную, либо определяется автоматически на основе сегментации [7, 13–15]. Пусть r – радиус шара, (i_0, j_0) – центр шара, $B_r(i_0, j_0)$ – множество точек шара. Точка является потенциальным центром шара, если каждая точка потенциального шара принадлежит заданной области Q , то есть выполнено условие $\forall (i, j) \in B_r(i_0, j_0): f_{ij} = 1$. Пусть m_{ij} – маска, которая описывает шар и равна $m_{ij} = 1$, при $(i - i_0)^2 + (j - j_0)^2 \leq r^2$ и $m_{ij} = 0$ в остальных случаях.

Для проверки принадлежности всех точек шара заданной области используем операцию импликации: $m_{kl} \rightarrow f_{ij}$. Изображение потенциальных центров формируется следующим образом:

$$c_{ij} = \bigcap_k \bigcap_l [m_{kl} \rightarrow f_{i-r+k, j-r+l}].$$

Таким образом, получаем изображение c_{ij} , соответствующее потенциальным центрам шаров (рис. 2б).

На следующем этапе требуется расставить центры шаров в полученную область так, чтобы расстояния между центрами были не меньше заданного и при этом количество центров должно быть максимальным. Технология расстановки коагулятов представлена на рис. 2. Исходное изображение (рис. 2а) содержит следы нанесённых микроожогов с предыдущей операции. По такому изображению проще выделить область интереса. Более того, можно сравнить расстановку коагулятов, сформированную в процессе операции, и автоматическую расстановку предложенными в работе алгоритмами.

3. Алгоритмы заполнения коагулятами глазного дна в области потенциальных центров шаров

В работе были предложены 7 алгоритмов, каждый из которых характеризуется определённой картой – способом размещения коагулятов: случайная карта, квадратная карта, гексагональная карта, упорядоченная карта, волновая карта, граничная карта, адаптивная

границная карта (рис. 3). Предложенные алгоритмы впервые были описаны в работе [8]. Данные алгоритмы обеспечивают «псевдооптимальное» решение. Задача поиска расстановки коагулятов не гарантирует оптимального решения (расстановку максимального

количества коагулятов в область интереса), что отличает её от задачи плотной упаковки шаров [16, 17]. Тем не менее, решения достаточно для проведения эффективной терапии. Ранее такая задача не решалась вследствие отсутствия возможности применения [1].

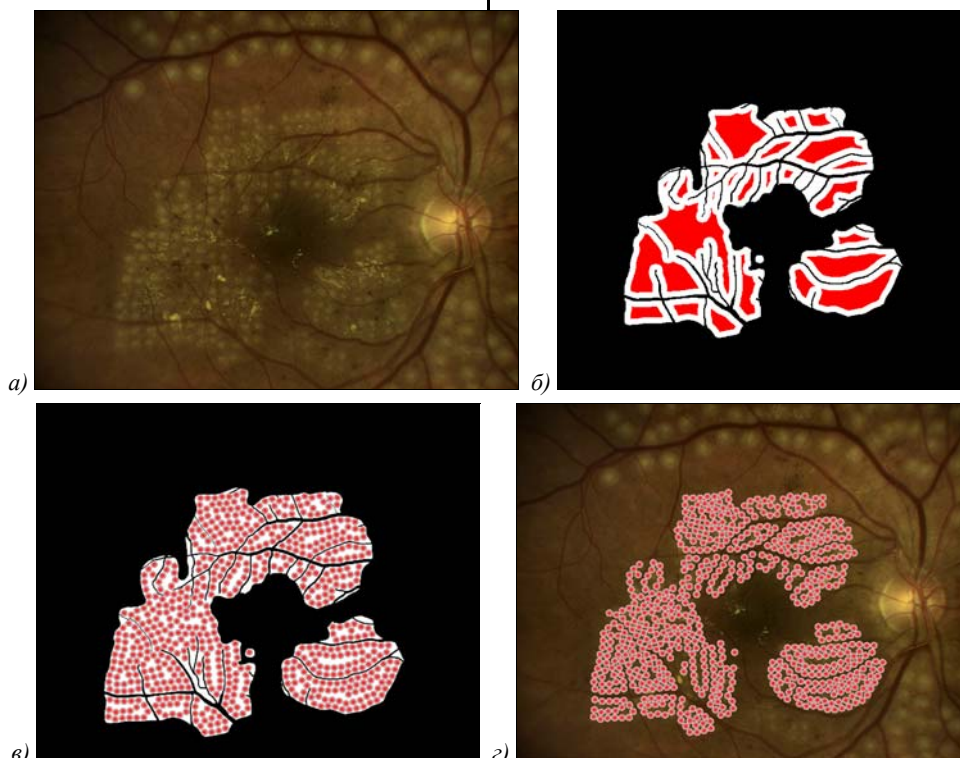


Рис. 2. Технология расстановки коагулятов: а) исходное натурное изображение, б) изображение потенциальных центров шаров (красная область) на фоне области интереса (белая область), в) решение задачи плотной упаковки шаров, г) карта расстановки коагулятов

Алгоритм, основанный на случайном заполнении шарами заданной области

Пусть X_k – случайный вектор, область определения которого C_k . Алгоритм, основанный на случайном заполнении шарами заданной области, представляет собой следующий итерационный процесс: $\bar{x} = X_k$; $C_{k+1} = C_k \setminus B_r(\bar{x})$, r – минимальное расстояние между центрами шаров. На практике реализуется дискретный случай, то есть генерируется дискретная случайная величина с областью значений $\{1, \dots, L_k\}$, где значение случайной величины соответствует номеру точки в области C_k . Аналогично предыдущему алгоритму, алгоритм останавливается, если $C_k = \emptyset$. Реализация описанного алгоритма была названа случайной картой и представлена на рис. 3а.

Данный алгоритм будет использоваться для сравнения результатов разработанных алгоритмов в качестве самого неоптимального, так как алгоритм является наименее упорядоченным и не учитывает форму области интереса для заполнения коагулятами.

Алгоритм, основанный на трансформации сетки, образуемой векторами трансляции

Пусть двумерная сетка задаётся при помощи векторов трансляции \bar{a} и \bar{b} . Любой узел двумерной

сетки определяется выражением $\bar{x} = i\bar{a} + j\bar{b}$. Введём оператор трансформации: $\Phi_{\varphi\bar{s}}[\bar{x}] = M_\varphi\bar{x} + \bar{s}$, где φ – угол поворота сетки; M_φ – матрица вращения; \bar{s} – смещение сетки от начала координат [19].

Введём понятие трансформированной ограниченной сетки как такой двумерной и трансформированной сетки, из которой исключены узлы, не попадающие в заданную область Q . В соответствии с данным определением трансформированная ограниченная сетка описывается выражением

$$Y_{\varphi\bar{s}}^{\bar{a}\bar{b}} = \{ \bar{y} = 2r\Phi_{\varphi\bar{s}}[i\bar{a} + j\bar{b}] : i, j \in \mathbb{Z}, \bar{y} \in Q \}.$$

На практике индексы i и j ограничиваются таким диапазоном целых чисел, который в принципе не может выходить за пределы обрабатываемого изображения. Задача сводится к поиску таких значений φ и \bar{s} , которые обеспечат наиболее оптимальную трансформацию сетки, то есть решение задачи

$$\left| Y_{\varphi\bar{s}}^{\bar{a}\bar{b}} \right| \rightarrow \max_{(\varphi, \bar{s})}.$$

С учётом дискретности области интереса вектор \bar{s} и угол φ принимают значения из конечного множества с небольшой мощностью. Данную задачу оптимизации допускается решать методом простого перебора.

Векторы \bar{a} и \bar{b} задаются в соответствии с желаемой формой сетки. Наибольший интерес представляют собой квадратная сетка, у которой $\bar{a}=(1\ 0)^T$ и $\bar{b}=(0\ 1)^T$; и гексагональная сетка, у которой $\bar{a}=(1\ 0)^T$ и $\bar{b}=(\cos \pi/3\ \sin \pi/3)^T$. Квадратная сетка соответствует паттернам, использу-

емым в программном комплексе NAVILAS, а гексагональная сетка соответствует самой плотной структуре упаковки шаров в пространстве (рис. 3б) [18]. Упомянутые варианты реализации разработанного алгоритма были названы соответственно квадратной картой и гексагональной картой.

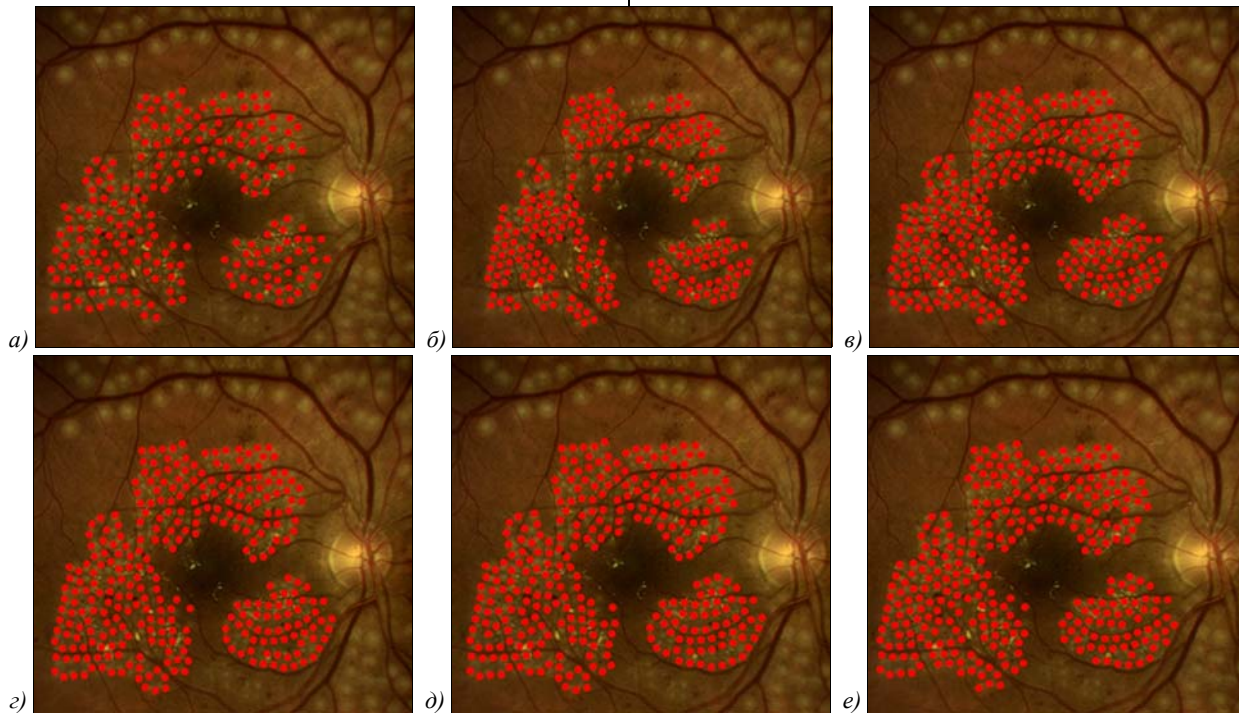


Рис. 3. Результаты работы алгоритмов заполнения коагулятами глазного дна: а) случайная карта, б) гексагональная карта, в) упорядоченная карта, г) волновая карта, д) граничная карта, е) адаптивная граничная карта

Алгоритм, основанный на упорядоченном заполнении шарами произвольной области

Идея алгоритма состоит в последовательном заполнении шарами потенциальных центров. Для формализации данного алгоритма введём множество $C_0 = C$ – множество потенциальных центров. Преобразование двумерных индексов в одномерный индекс будет осуществляться по формуле $l = i \cdot w + j$, где w – ширина изображения. Любая точка дискретного изображения получается как $\bar{x}_l = \bar{x}_{i \cdot w + j}$. Тогда поиск первого попавшегося потенциального центра соответствует выражению $l^* = \min \{l : \bar{x}_l \in C\}$. Тогда алгоритм представляет собой следующий итерационный процесс: $l_{k+1} = \min \{l : \bar{x}_l \in C_k\}$; $C_{k+1} = C_k \setminus B_r(\bar{x}_{l_{k+1}})$, r – минимальное расстояние между центрами шаров. Алгоритм останавливается, если $C_k = \emptyset$. Реализация данного алгоритма была названа упорядоченной картой (рис. 3в).

Алгоритм, основанный на волновом заполнении шарами заданной области

Назовём волной такую последовательность точек $G = (\bar{g}_i)_{i=1, \overline{K}}$, которая строится по следующему ите-

рационному процессу: $\bar{g}_{k+1} = \bar{g}_k + \bar{p}_k$, где \bar{p}_k – единичный вектор, характеризующий направление.

На каждой итерации определяется последовательность направлений $P_k = (\bar{p}_i)_{i=1, \overline{I_k}}$ по следующему правилу:

$$P = P_n^{l_k},$$

где $P_n^l = (\bar{e}_{(i+l) \bmod 4})_{i=1, \overline{I_k}}$, l_k – номер направления на итерации

$$k. P' = P \setminus (-\bar{p}_k); P_{k+1} = P' \setminus T,$$

где $T = \{\bar{p} \in P_{k+1} : \bar{g}_k + \bar{p} \in G_k\}$; $G_{k+1} = G_k \cup g_{k+1}$ волна обходит область, образуя форму, соответствующую исходной последовательности направлений P_n^0 , и заканчивается, когда точка заходит в тупик, то есть $P_k = \emptyset$. Алгоритм запускает волны до тех пор, пока вся область не будет заполнена. Соответствующая реализация алгоритма была названа волновой картой (рис. 3г).

Алгоритм, основанный на граничном заполнении шарами заданной области

Идея алгоритма заключается в выделении из области потенциальных центров C подобластей C_1, \dots, C_N . При выделении области C_n выделяются граничные точки. Точка \bar{x} является внутренней относительно области Q ,

если $\bar{x} \in Q$ и $\forall \varphi [\bar{x} + (\cos \varphi \ \sin \varphi)^T \theta] \in Q$, где θ – бесконечно малая величина. Точка, не являющаяся внутренней относительно области Q , является граничной. В дискретном случае точка \bar{x}_{ij} является внутренней, если

$$\bar{x}_{ij} \in Q \wedge \bar{x}_{i+1j} \in Q \wedge \bar{x}_{ij+1} \in Q \wedge \bar{x}_{i-1j} \in Q \wedge \bar{x}_{ij-1} \in Q.$$

Область граничных точек B заполняется шарами в соответствии с итерационным процессом следующего вида: $\bar{x} = \text{next}[B_k]$; $B_{k+1} = B_k \setminus B_r(\bar{x})$; $C_{k+1} = C_k \setminus B_r(\bar{x})$.

Алгоритм представляет собой итерационный процесс, в котором на каждой итерации выделяется первая попавшаяся подобласть и граница подобласти заполняется шарами. Таким образом, из области C_k исключаются зоны, в которые не могут попасть центры шаров на следующих итерациях. Реализация данного алгоритма была названа граничной картой (рис. 3д).

Алгоритм, основанный на адаптивном заполнении границ подобластей

Данный алгоритм представляет собой модификацию алгоритма, основанного на граничном заполнении области. Каждая итерация алгоритма аналогичным образом представляет собой выделение первой подобласти, но граница заполняется адаптивно.

Пусть $B_k = \{\bar{b}_i, i = \overline{1, K}\}$ – множество граничных точек. Определим множество точек $G \subseteq B$ как: $G = \{\bar{g} \in B : \forall \bar{g}' \neq \bar{g} (\bar{g}' \in B \wedge \|\bar{g}' - \bar{g}\| \geq r)\}$. Множество G соответствует центрам шаров, лежащих на границе B_k . Адаптивное заполнение границы предполагает поиск последовательности, соответствующей выражению

$$\hat{G} = \arg \max_G |G|.$$

Алгоритм ориентируется на решение указанной задачи в дискретном случае, которое обеспечивает адаптивное заполнение границы выделенной подобласти. Дискретность области интереса существенно ограничивает количество возможных границ. Поэтому предлагается решать описанную задачу оптимизации методом простого перебора. Описанная реализация алгоритма была названа адаптивной граничной картой (рис. 3е).

Так как алгоритм, основанный на случайной карте, заполняет область интереса шарами в случайном порядке, то результат такого алгоритма не может обладать равномерностью заполнения коагулятами и обычно представляет собой наименее плотную упаковку шаров.

Алгоритм, основанный на гексагональной карте, и алгоритм, основанный на квадратной карте, представляют собой реализации алгоритма, основанного на трансформации сетки, с различными векторами трансляции. Алгоритмы обеспечивают наибольшую регулярность расположения коагулятов, но не самый оптимальный вариант их расстановки.

Остальные алгоритмы не образуют регулярность карты. Они ориентированы на обеспечение наибольшей плотности упаковываемых шаров.

4. Результаты экспериментального исследования

Эффективность терапии определяется степенью регулярности расстановки коагулятов (близости сформированной карты к равномерной сетке), минимальным разбросом расстояний (дисперсии) и площадью покрытия коагулятами области с заболеванием [1]. В настоящей работе исследование направлено на извлечение информации из рассматриваемых характеристик. Для анализа было выбрано изображение глазного дна с достаточно сложной формой отёка. Изображение имеет разрешение 96 dpi и размеры 1300×1200. По данному изображению вручную выделена область интереса. Проанализируем влияние стандартных характеристик случайной величины (СВ) на упомянутые свойства.

Примем за СВ минимальное расстояние от рассматриваемого коагулята до всех остальных (1).

$$d_i = \min_k d(\bar{x}_i, \bar{x}_k), \quad (1)$$

где \bar{x}_i – i -й коагулят; $d(\bar{x}_i, \bar{x}_k)$ – евклидово расстояние между коагулятами.

Записав расстояния для всех коагулятов по формуле (1), получаем реализацию СВ. Рассмотрим основные характеристики для данной реализации СВ: среднее, медиана, асимметрия, эксцесс, дисперсия выборки. Рассмотрим в качестве дополнительного критерия количество элементов в выборке (количество упакованных шаров).

Имея бинарное изображение с выделенной областью интереса, заполнив его при помощи заданного алгоритма коагулятами, можем вычислить расстояния, которые будут представлять собой ранее упомянутую реализацию СВ. Основным параметром алгоритма плотной упаковки шаров является радиус шара r . Зададим $r=15$. В таком случае минимальное расстояние между шарами (коагулятами) будет равно 30.

В табл. 1 представлены результаты исследования алгоритмов заполнения коагулятами области интереса. Показательной характеристикой качества работы алгоритма является дисперсия, характеризующая степень разброса расстояний между коагулятами [1]. Алгоритмы, основанные на выборе оптимальной сетки, приводят к достаточно большой дисперсии. Наименьшую дисперсию обеспечивают алгоритмы, основанные на нерегулярном заполнении области коагулятами. По данному критерию наилучшим алгоритмом оказался алгоритм, основанный на упорядоченной карте. Следует отметить, что алгоритм, основанный на упорядоченной карте, обладает самой низкой вычислительной сложностью.

Как видно из табл. 1, самые несимметричные плотности распределения наблюдаются у алгоритмов, основанных на нерегулярных картах. При этом данные алгоритмы приводят к достаточно острым пикам, так как наблюдается очень большой эксцесс. Однако среднее расстояние у «нерегулярных» алгоритмов оказывается ближе к 30.

Табл. 1. Характеристики работы алгоритмов заполнения коагулятами области интереса

Карта	Дисперсия	Среднее	Асимметрия	Медиана	Экспесс	Количество
Случайная	6,32	32,38	1,60	31,62	2,84	223
Квадратная	6,09	30,51	4,67	30,00	19,97	220
Гексагональная	7,68	30,35	7,73	30,00	58,21	248
Волновая	0,95	30,23	14,88	30,08	242,45	311
Граничная	0,90	30,21	16,30	30,08	277,79	305
Адаптивная граничная	0,70	30,18	16,26	30,07	279,50	315
Упорядоченная	0,19	30,17	9,18	30,08	101,50	312

Анализируя распределения расстояний, можно обнаружить несколько принципиальных особенностей. Будем рассматривать гистограммы на различных диапазонах значений СВ. Первым значением оси абсцисс будем рассматривать минимальное расстояние между коагулятами, поскольку количество коагулятов с заданным минимальным расстоянием определяет плотность упаковки коагулятов.

Как видно из рис. 4, случайная карта демонстрирует высокий разброс расстояний, что лишнее подчеркивает недетерминированность алгоритма. Это видно по значению эксцесса и асимметрии. Однако регулярная карта разброса не даёт (рис. 5). Среди возможных расстояний встречается в основном только минимальное расстояние, поскольку коагуляты находятся в узлах транслируемой сетки.

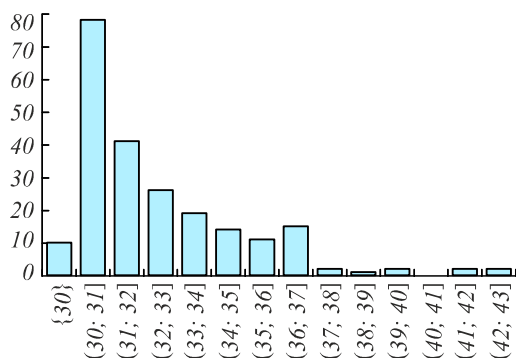


Рис. 4. Гистограмма распределения расстояний для алгоритма, основанного на случайной карте

Детерминированные алгоритмы, основанные на нерегулярных картах, демонстрируют распределение, напоминающее распределение для регулярных алгоритмов, если рассматривать дискретизацию с шагом 1. Рассматривая более мелкие диапазоны и отдельные значения расстояний, получаем распределение, похожее на распределение недетерминированного алгоритма.

Проанализируем гистограммы распределения расстояний для алгоритма, основанного на адаптивной граничной карте (рис. 6), и алгоритма, основанного на упорядоченной карте (рис. 7).

В «нерегулярных» алгоритмах по большей части наблюдаются расстояния от 30 до 30,8.

Упорядоченная карта позволяет снизить частоту появления подавляющего большинства расстояний. Несмотря на то, что, по результатам оценки дисперсии, упорядоченная карта лучше, чем адаптивная граничная карта, по количеству упакованных шаров адаптивно граничная карта выигрывает. Данное явление объясняется сложностью выделенной области

интереса. В связи с этим возникает необходимость определения дополнительных критериев качества расстановки коагулятов, позволяющих оценить карту в целом (учитывая покрытую шарами площадь и количество упакованных шаров).

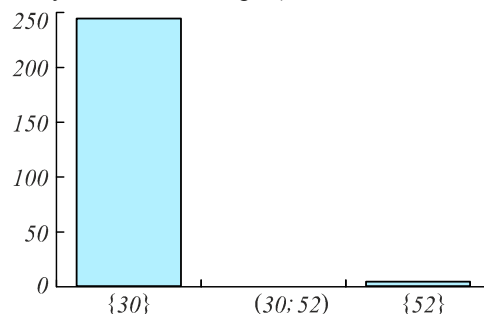


Рис. 5. Гистограмма распределения расстояний для алгоритма, основанного на гексагональной карте

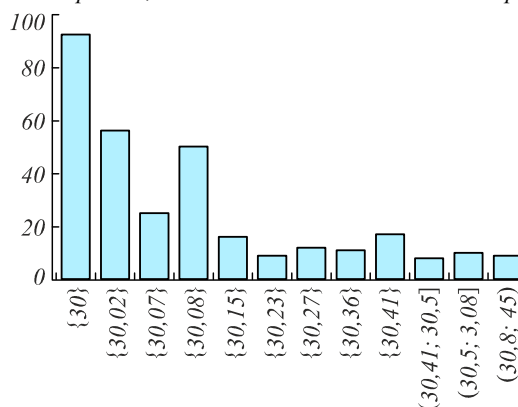


Рис. 6. Гистограмма распределения расстояний для алгоритма, основанного на адаптивной граничной карте

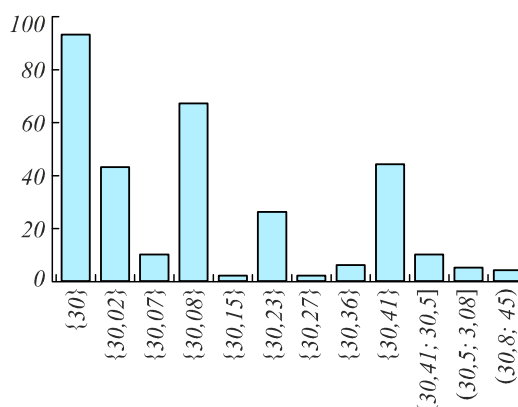


Рис. 7. Гистограмма распределения расстояний для алгоритма, основанного на упорядоченной карте

Следует отметить, что степень «регулярности» позволяет отражать медиана. В регулярных алгоритмах

подавляюще большой частотой обладает минимальное расстояние. Данное свойство сильно коррелирует с медианой.

Таким образом, настоящее исследование позволяет сделать следующие выводы:

1. По критерию «дисперсия» наилучшим алгоритмом заполнения коагулятами области интереса оказывается алгоритм, основанный на упорядоченной карте.
2. По критерию «количество упакованных шаров» наилучшей картой оказывается адаптивно граничная карта.
3. Для регулярного и нерегулярного алгоритмов рассмотренные критерии существенно отличаются.
4. Степень регулярности карты можно отслеживать по значению медианы.
5. Степень детерминированности алгоритма может быть отслежена по значениям эксцессы и асимметрии.

Заключение

Были проанализированы разработанные алгоритмы заполнения коагулятами области интереса изображения глазного дна, предназначенные для повышения эффективности лазерной коагуляции. Ключевым критерием эффективности является степень разброса расстояний между коагулятами – дисперсия. Алгоритм, основанный на упорядоченной карте, обеспечивает наилучшую дисперсию. Однако алгоритм, основанный на адаптивной граничной карте, заполняет коагулятами больше площади.

Рассмотренные в работе критерии позволяют разграничивать алгоритмы заполнения коагулятами области интереса по типам: регулярный/нерегулярный, детерминированный/ндетерминированный. В дальнейшем определение типа алгоритма будет важно, поскольку каждый алгоритм может оказать индивидуальный положительный эффект при лечении диабетической ретинопатии.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках выполнения работ по Государственному заданию ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН (соглашение № 007-ГЗ/ЧЗ363/26) в части «алгоритмов поиска потенциальных центров», в рамках реализации мероприятий Программы повышения конкурентоспособности Самарского Университета среди ведущих мировых научно-образовательных центров на 2013–2020 годы в части «анализ эффективности разработанных алгоритмов», грантов РФФИ № 15-29-03823, № 16-41-630761, № 17-01-00972, № 18-37-00418 в части «алгоритмов заполнения коагулятами глазного дна».

Литература

1. Замыцкий, Е.А. Лазерное лечение диабетического макулярного отёка // Аспирантский вестник Поволжья. – 2015. – № 2 – С. 74-79.

2. Ильясова, Н.Ю. Информационные технологии анализа изображений в задачах медицинской диагностики / Н.Ю. Ильясова, А.В. Куприянов, А.Г. Храмов. – М.: Радио и связь, 2012. – 424 с. – ISBN: 5-89776-014-4.
3. Ильясова, Н.Ю. Методы цифрового анализа сосудистой системы человека. Обзор литературы // Компьютерная оптика. – 2013. – Т. 37, № 4. – С. 517-541.
4. Дога, А.В. Современные аспекты диагностики и лечения диабетического макулярного отёка / А.В. Дога, Г.Ф. Качалина, Е.К. Педанова, Д.А. Буряков // Сахарный диабет. – 2014. – Т. 4. – С. 51-59. – DOI: 10.14341/DM2014451-59.
5. Issa, P.C. Macular telangiectasia type 2 / P.C. Issa, M.C. Gillies, E.Y. Chew, A.C. Bird, T.F.C. Heeren, T. Peto, F.G. Holz, H.P.N. Scholl // Progress in Retinal and Eye Research. – 2013. – Vol. 34. – P. 49-77. – DOI: 10.1016/j.preteyeres.2012.11.002.
6. Galiev, S.I. Linear models for the approximate solution of the problem of packing equal circles into a given domain / S.I. Galiev, M.S. Lisafina // European Journal of Operational Research. – 2013. – Vol. 230, Issue 3. – P. 505-514. – DOI: 10.1016/j.ejor.2013.04.050.
7. Pyasova, N. A smart feature selection technique for object localization in ocular fundus images with the aid of color subspaces / N. Ilyasova, R. Paringer, A. Shirokanev, A. Kupriyanov, N. Ushakova // Procedia Engineering. – 2017. – Vol. 201. – P. 736-745. – DOI: 10.1016/j.proeng.2017.09.599.
8. Pyasova, N. Coagulate map formation algorithms for laser eye treatment / N. Ilyasova, D. Kirsh, R. Paringer, A. Kupriyanov, A. Shirokanev // Proceedings of the 2017 3rd International Conference on Frontiers of Signal Processing (ICFSP). – 2017. – P. 1-5.
9. Clarkson, D.McG. Determination of pulse profile characteristics of multi spot retinal photocoagulation lasers / D.McG. Clarkson, O. Makhzoum, J. Blackburn // Medical Engineering & Physics. – 2015. – Vol. 37, Issue 10. – P. 1027-1031. – DOI: 10.1016/j.medengphy.2015.07.009.
10. Syed, A.M. Automated diagnosis of macular edema and central serous retinopathy through robust reconstruction of 3D retinal surfaces / A.M. Syed, T. Hassan, M.U. Akram, S. Naz, S. Khalid // Computer Methods and Programs in Biomedicine, 2016. – Vol. 137. – P. 1-10. – DOI: 10.1016/j.cmpb.2016.09.004.
11. Chhablani, J. A novel navigated laser system brings new efficacy to the treatment of retinovascular disorders / J. Chhablani, I. Kozak, G. Barteselli, S. El-Eman // Oman Journal of Ophthalmology. – 2013. – Vol. 6, Issue 1. – P. 18-22. – DOI: 10.4103/0974-620X.111898.
12. Navilas[®] ultra-wide-field PRP [Electronical Resource]. – URL: <https://www.youtube.com/watch?v=hNc9HAu0jBM> (request date 21.06.2018).
13. Pyasova, N.Yu. The effective features formation for the identification of regions of interest in a fundus images / N.Yu. Ilyasova, R.A. Paringer, A.V. Kupriyanov, N.S. Ushakova // CEUR Workshop Proceedings. – 2016. – Vol. 1638. – P. 788-795. – DOI: 10.18287/1613-0073-2016-1638-788-795.
14. Pyasova, N. Regions of interest in a fundus image selection technique using the discriminative analysis methods / N. Ilyasova, R. Paringer, A. Kupriyanov. – In book: International Conference on Computer Vision and Graphics. ICCVG 2016: Computer Vision and Graphics / ed. by L.J. Chmielewski, A. Datta, R. Kozera, K. Wojciechowski. – Cham: Springer, 2016. – P. 408-417. – DOI: 10.1007/978-3-319-46418-3_36.

15. **Ильасова, Н.Ю.** The discriminant analysis application to refine the diagnostic features of blood vessels images / N.Yu. Ilyasova, A.V. Kupriyanov, R.A. Paringer // *Optical Memory & Neural Networks (Information Optics)*. – 2015. – Vol. 24, Issue 4. – P. 309-313. – DOI: 10.3103/S1060992X15040037.
16. **Казаков, А.Л.** Алгоритмы построения оптимальных упаковок для компактных множеств на плоскости / А.Л. Казаков, П.Д. Лебедев // *Вычислительные методы и программирование*. – 2015. – Т. 16, Вып. 2. – С. 307-317.
17. **Казаков, А.Л.** Об одном алгоритме построения упаковок конгруэнтных кругов в неодносвязное множество с неевклидовой метрикой / А.Л. Казаков, А.А. Лемперт, Г.Л. Нгуен // *Вычислительные методы и программирование*, 2016. – Т. 17. – С. 177-188.
18. **Яськов, Г.Н.** Метод решения задачи упаковки разных кругов с выбором перспективных начальных точек / Г.Н. Яськов // *Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил*. – 2010. – № 3(25). – С. 119-122.
19. **Shirokanev, A.** Development of a vector algorithm of three-dimensional crystal lattice parametric identification based on estimation of the spacing between adjacent lattice planes / A. Shirokanev, D. Kirsh, A. Kupriyanov // *Procedia Engineering*. – 2017. – Vol. 201. – P. 690-697. – DOI: 10.1016/j.proeng.2017.09.684.

Сведения об авторах

Широканев Александр Сергеевич, аспирант Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королева; стажёр-исследователь лаборатории математических методов обработки изображений Института систем обработки изображений РАН – филиала ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН. Сфера научных интересов: методы идентификации кристаллических решёток; цифровая обработка изображений; математическое моделирование; численные методы. E-mail: alexandr-shirokanev@yandex.ru.

Кириш Дмитрий Викторович, 1990 года рождения. В 2018 году окончил аспирантуру Самарского университета по направлению информатика и вычислительная техника. В настоящее время ассистент кафедры технической кибернетики Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королева; стажёр-исследователь лаборатории математических методов обработки изображений Института систем обработки изображений РАН – филиала ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН. Сфера научных интересов: цифровая обработка изображений и распознавание образов; методы описания и сравнения кристаллических решёток; классификация кристаллических решёток. E-mail: limitk@mail.ru.

Ильасова Наталья Юрьевна, 1966 года рождения. В 1991 году окончила с отличием Самарский государственный аэрокосмический университет имени С.П. Королёва (СГАУ). В 1997 году защитила диссертацию на соискание степени кандидата технических наук, в 2015 году защитила диссертацию на соискание степени доктора технических наук. В настоящее время работает старшим научным сотрудником в Институте систем обработки изображений РАН – филиала ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН и одновременно доцентом кафедры технической кибернетики Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королёва. Круг научных интересов включает цифровую обработку сигналов и изображений, анализ и интерпретацию биомедицинских изображений. Имеет более 100 публикаций, в том числе 35 статей и три монографии (в соавторстве). E-mail: iyasova@smr.ru.

Куприянов Александр Викторович, профессор кафедры технической кибернетики Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королёва; старший научный сотрудник лаборатории математических методов обработки изображений Института систем обработки изображений РАН – филиала ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН. Сфера научных интересов: цифровая обработка сигналов и изображений; распознавание образов и искусственный интеллект; анализ и интерпретация биомедицинских сигналов и изображений. E-mail: alexkubr@gmail.com.

ГРПТИ: 28.23.15

Поступила в редакцию 18 мая 2018 г. Окончательный вариант – 27 июня 2018 г.

INVESTIGATION OF ALGORITHMS FOR COAGULATE ARRANGEMENT IN FUNDUS IMAGES

A.S. Shirokanev¹, D.V. Kirsh^{1,2}, N.Yu. Ilyasova^{1,2}, A.V. Kupriyanov^{1,2}

¹ Samara National Research University, 443086, Russia, Samara, Moskovskoye Shosse 34,

² IPSI RAS - Branch of the FSRC "Crystallography and Photonics" RAS, 443001, Samara, Russia, Molodogvardeyskaya 151,

Abstract

Diabetic retinopathy is one of the most frequent complications of diabetes, which leads to severe consequences, including rapid and irreversible vision loss. The laser coagulation procedure to treat diabetic retinopathy consists in applying a series of microburns to the fundus to deal with macular edema.

The existing hardware/software packages are primarily based on the use of a predetermined pattern for coagulate arrangement. However, due to the complex form of edema and vascular system, this approach leads to an uneven arrangement. To solve the problem, we propose a new approach based on the application of sphere packing algorithms (circle packing in two-dimensional images) in the specified area of interest. Since one of the main requirements for the laser coagulation procedure is that it should have the minimum duration, a problem of the computational complexity of the developed algorithms arises. This requirement is completely ignored by the existing approaches, therefore the development of new high-performance coagulate arrangement algorithms is highly relevant.

In the paper, we propose seven new algorithms for coagulate arrangement and provide a detailed analysis of key characteristics of the algorithms. The characteristics considered have made it possible to extract information relating to the algorithm properties. Regularity is determined by the median, asymmetry and the kurtosis; determinism is determined by the variance and the mean.

Keywords: image processing, sphere packing problem, laser coagulation, fundus, sphere packing, diabetic retinopathy, iteration process, binary image, distribution histogram.

Citation: Shirokanev AS, Kirsh DV, Ilyasova NYu, Kupriyanov AV. Investigation of algorithms for coagulate arrangement in fundus images. *Computer Optics* 2018; 42(4): 712-721. DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-4-712-721.

Acknowledgements: This work was supported by the Ministry of Science and Higher Education within the State assignment FSRC "Crystallography and Photonics" RAS (No 007-Г3/Ч3363/26) in part of "algorithms of potential centers detection"; in the framework of the implementation of the Program of increasing the competitiveness of Samara University among the world's leading scientific and educational centers for 2013-2020 years in part of "analysis of developed algorithms efficiency"; by the Russian Foundation for Basic Research grants (# 15-29-03823, # 16-41-630761, # 17-01-00972, # 18-37-00418) in part of "algorithms of coagulate filling for eye fundus".

References

- [1] Zamyckij EA. Laser treatment of diabetic macular edema [In Russian]. *Aspirantskiy Vestnik Povolzhya* 2015; 2: 79.
- [2] Ilyasova NYu, Kupriyanov AV, Khramov AG. Information technologies of image analysis in problems of medical diagnostics [In Russian]. Moscow: "Radio i Svyaz" Publisher; 2012. ISBN: 5-89776-014-4.
- [3] Ilyasova NYu. Methods for digital analysis of human vascular system. Literature review. *Computer Optics* 2013; 37(4): 517-541.
- [4] Doga AV, Kachalina GF, Pedanova EK, Buryakov DA. Modern diagnostic and treatment aspects of diabetic macular edema [In Russian]. *Diabetes Mellitus* 2014; 4: 51-59. DOI: 10.14341/DM2014451-59.
- [5] Issa PC, Gillies MC, Chew EY, Bird AC, Heeren TFC, Peto T, Holz FG, Scholl HPN. Macular telangiectasia type 2. *Prog Retin Eye Res* 2013; 34: 49-77. DOI: 10.1016/j.preteyeres.2012.11.002.
- [6] Galiev SI, Lisafina MS. Linear models for the approximate solution of the problem of packing equal circles into a given domain. *European Journal of Operational Research* 2013; 230(3): 505-514. DOI: 10.1016/j.ejor.2013.04.050.
- [7] Ilyasova N, Paringer R, Shirokanev A, Kupriyanov A, Ushakova N. A smart feature selection technique for object localization in ocular fundus images with the aid of color subspaces. *Procedia Engineering* 2017; 201: 736-745. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.09.599.
- [8] Ilyasova N, Kirsh D, Paringer R, Kupriyanov A, Shirokanev A. Coagulate map formation algorithms for laser eye treatment. *Proc 3rd ICFSP* 2017: 1-5. DOI: 10.1109/ICFSP.2017.8097154.
- [9] Clarkson D.McG., Makhzoumb O., Blackburn J. Determination of pulse profile characteristics of multi spot retinal photocoagulation lasers. *Medical Engineering & Physics* 2015; 37(10): 1027-1031. DOI: 10.1016/j.medengphy.2015.07.009.
- [10] Syed AM, Hassan T, Akram MU, Naz S, Khalid S. Automated diagnosis of macular edema and central serous retinopathy through robust reconstruction of 3D retinal surfaces. *Comput Methods Programs Biomed* 2016; 137: 1-10. DOI: 10.1016/j.cmpb.2016.09.004.
- [11] Chhablani J, Kozak I, Barteselli G, El-Eman S. A novel navigated laser system brings new efficacy to the treatment of retinovascular disorders. *Oman J Ophthalmol* 2013; 6(1): 18-22. DOI: 10.4103/0974-620X.111898.
- [12] Navilas[®] ultra-wide-field PRP. Source: <<https://www.youtube.com/watch?v=hNc9HAu0jBM>>.
- [13] Ilyasova NYu, Paringer RA, Kupriyanov AV, Ushakova NS. The effective features formation for the identification of regions of interest in a fundus images. *CEUR Workshop Proceedings* 2016; 1638: 788-795. DOI: 10.18287/1613-0073-2016-1638-788-795.
- [14] Ilyasova N, Paringer R, Kupriyanov A. Regions of interest in a fundus image selection technique using the discriminative analysis methods. In Book: Chmielewski LJ, Datta A, Kozera R, Wojciechowski K, eds. *International Conference on Computer Vision and Graphics. ICCVG 2016: Computer Vision and Graphics*. Cham: Springer; 2016: 408-417. DOI: 10.1007/978-3-319-46418-3_36.
- [15] Ilyasova NYu, Kupriyanov AV, Paringer RA. The discriminant analysis application to refine the diagnostic features of blood vessels images. *Optical Memory & Neural Networks* 2015; 24(4): 309-313. DOI: 10.3103/S1060992X15040037.
- [16] Kazakov AL, Lebedev PD. Algorithms of optimal packing construction for planar compact sets [In Russian]. *Vychisl Metody Programm* 2015; 16(2): 307-317.
- [17] Kazakov AL, Lempert AA, Nguyen HL. An algorithm of packing congruent circles in a multiply connected set with non-euclidean metrics [In Russian]. *Vychisl Metody Programm* 2016; 17: 177-188.
- [18] Yas'kov GN. Method of decision of task of packing of different circles with choice of perspective initial points [In

Russian]. Scientific Works of Kharkiv National Air Force University 2010; 3(25): 119-122.
[19] Shirokanev A, Kirsh D., Kupriyanov A. Development of a vector algorithm of three-dimensional crystal lattice para-

metric identification based on estimation of the spacing between adjacent lattice planes. Procedia Engineering 2017; 201: 690-697. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.09.684.

Author's information

Aleksandr Sergeevich Shirokanev, (b. 1993), is a postgraduate student of Samara University. He graduated (2017) with a master's degree in applied mathematics and informatics. At present he is a junior researcher at the IPSI RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS. The area of interests includes digital image processing, mathematical modeling, numerical recipes and pattern recognition. E-mail: alexandrshirokanev@gmail.com.

Dmitriy Victorovich Kirsh, (b. 1990), completed (2018) the postgraduate program in Computer Science and Computer Engineering. At present he is a lecturer at the Technical Cybernetics Department of Samara University and also a junior researcher at the IPSI RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS. The area of interests includes digital image processing and pattern recognition, methods of mathematical formulation and comparison of crystal lattices, classification of crystal lattices. E-mail: limitk@mail.ru.

Nataly Yu. Ilyasova (b. 1966), graduated with honors from S.P. Korolyov Samara State Aerospace University (SSAU) (1991). She received her PhD (1997) and DSc (2015) in Technical Sciences. At present, she is a senior researcher at the IPSI RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS, and holding a part-time position of Associate Professor at Samara University Technical Cybernetics sub-department. The area of interests includes digital signals and image processing, pattern recognition and artificial intelligence, biomedical imaging and analysis. She's list of publications contains more than 100 scientific papers, including 35 articles and 3 monographs published with co-authors. E-mail: ilyasova@smr.ru.

Alexandr Victorovich Kupriyanov, (b. 1978), graduated (2001) from the S.P. Korolyov Samara State Aerospace University (SSAU). He received his PhD in Technical Sciences (2004). At present he is a senior researcher at the IPSI RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS, and holding a part-time position of Associate Professor at Technical Cybernetics department of Samara University. The area of interests includes digital signals and image processing, pattern recognition and artificial intelligence, biomedical imaging and analysis. His list of publications contains more than 80 scientific papers, including 35 articles and 1 monograph published. E-mail: alexpupr@gmail.com.

Received May 18, 2018. The final version – June 27, 2018.

Дизайн: Я.Е. Тахтаров. Оформление и вёрстка: М.А. Вахе, Е.В. Семиколенных, С.В. Смагин и Я.Е. Тахтаров.
Лит. редактор и корректор Ю.Н. Литвинова. Консультант по оформлению англоязычного блока М.И. Котляр.
E-mail: ko@smr.ru, <http://www.computeroptics.smr.ru>

Подписано в печать 11.09.2018 г. Усл. печ. л. 23,10.
Заказ № 11/4. Тираж 206 экз. Печать офсетная. Формат 62×84 1/8.
Цена: 550 рублей / Price of 550 rubles (6+)

Редакция: Институт систем обработки изображений РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, (443010, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 151)
Соучредители: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» (443086, г. Самара, Московское шоссе, д.34),
Федеральное государственное учреждение «Федеральный научно-исследовательский центр «Кристаллография и фотоника» Российской академии наук» (117342, г. Москва, ул. Бултерова, д.17А)
Отпечатано в типографии ООО «Предприятие «Новая техника» (443013 г. Самара, пр-кт. Карла Маркса, 24-76)