

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
«Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

Факультет инфокоммуникаций
Кафедра инфокоммуникационных технологий

В. Ю. Цветков

СЕГМЕНТАЦИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ В СИСТЕМАХ ВИДЕОНАБЛЮДЕНИЯ

*Рекомендовано УМО по образованию
в области информатики и радиоэлектроники
в качестве учебно-методического пособия для специальности
1-45 80 01 «Системы и сети инфокоммуникаций»*

Минск БГУИР 2021

УДК 004.932.1:621.397.42(076)
ББК 32.972.13я73+32.94я73
Ц27

Рецензенты:

кафедра связи учреждения образования «Военная академия Республики Беларусь»
(протокол №17 от 13.04.2020);

заведующий кафедрой телекоммуникационных систем учреждения образования
«Белорусская государственная академия связи» кандидат технических наук,
доцент С. И. Половения

Цветков, В. Ю.

Ц27 Сегментация изображений в системах видеонаблюдения : учеб.-метод.
пособие / В. Ю. Цветков. – Минск : БГУИР, 2021. – 94 с. : ил.
ISBN 978-985-543-599-1.

Рассмотрены методы сегментации изображений на основе областей, часто используемые в системах видеонаблюдения, приведен краткий обзор алгоритмов на основе этих методов, описаны алгоритмы сегментации на основе древовидных структур, приведены практические задания по сегментации изображений с примерами решения.

Предназначено для студентов, изучающих дисциплину «Технологии видеонаблюдения и видеоаналитики».

УДК 004.932.1:621.397.42(076)
ББК 32.972.13я73+32.94я73

ISBN 978-985-543-599-1

© Цветков В. Ю., 2021
© УО «Белорусский государственный
университет информатики
и радиоэлектроники», 2021

Содержание

Введение	4
1. Сегментация изображений на основе областей	6
1.1. Выращивание областей	6
1.2. Разделение и слияние областей	8
2. Сегментация изображений на основе древовидных структур	11
2.1. Волновое выращивание областей на основе октодерева	11
2.2. Сегментация изображений на основе квадродерева	13
3. Практические задания по сегментации изображений	21
3.1. Практические задания по выращиванию областей	21
3.2. Практические задания по разделению и слиянию областей	70
Литература	90

Библиотека БГУИР

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время интенсивно развиваются системы наблюдения, как стационарные, так и мобильные. Важную роль в кодировании, передаче и обработке изображений в таких системах играет сегментация. Сегментация разделяет изображение на области со схожими характеристиками распределения яркости. Ее результатом является матрица, значение каждого элемента которой указывает на номер сегмента, которому принадлежит соответствующий пиксель изображения. Альтернативным вариантом представления результата сегментации является вектор, элементы которого указывают на положение пикселей, принадлежащих одному сегменту. Можно выделить методы сегментации на основе пороговой обработки [1], обработки областей (выращивание [2], разделение и слияние областей [3]) и водораздела [4].

Сегментация имеет высокую вычислительную сложность и вносит существенный вклад в общую вычислительную сложность кодирования и обработки, а также в задержку передачи изображений. Это базовая операция видеоаналитики. На ней основаны поиск, выделение, идентификация, классификация, анализ формы, размеров, ориентации и направления перемещения объектов.

Развитие мобильных систем наблюдения наземного, воздушного и космического базирования ставит новые, связанные с сегментацией задачи в кодировании и передаче многокадровых изображений (МРИ), формируемых одной или несколькими видеокамерами [5]. Это связано с увеличением размеров и скорости формирования изображений (от единиц мегабит в секунду до сотен терабит в секунду), ограничениями на пропускную способность радиоканалов (единицы килобит в секунду – десятки гигабит в секунду) и низкой эффективностью стандартных видеокодеков (максимальный коэффициент сжатия МРИ – десятки–сотни раз, вместо необходимого для передачи коэффициента сжатия – единицы–десятки тысяч раз). Причина неэффективности кодирования МРИ на основе стандартов MPEG-4, H.264, H.265 (HEVC) [6, 7] заключается в отсутствии учета межкадровой избыточности перекрывающихся фрагментов МРИ, обработке кадров от одной видеокамеры, прогнозировании на основе блочной и пиксельной компенсации движения. Стандарт MVC [8] и другие подходы [9–13], описывающие принципы кодирования стерео- и 3D-изображений в условиях малой стереобазы, одинаковых масштаба и угловой ориентации перекрывающихся фрагментов МРИ, также используют прогнозирование на основе блочной и пиксельной компенсации движения. Такое прогнозирование основано на геометрическом преобразовании переноса, с помощью которого из опорного изображения формируется прогнозное изображение, но оно не учитывает поворот, масштаб, а также проективные искажения, вызываемые перемещением видеокамеры. В стандарте MPEG-4 и работах [14–17] предлагается использовать сегментную и кадровую компенсацию движения на основе аффинного преобразования. Однако преобразования переноса и аффинное не в полной мере компенсируют межкадровую избыточность перекрывающихся фрагментов МРИ для произвольных геометрий пространств их формирования и траекторий перемещения видеокамеры. Это приводит к низким коэффициентам сжатия разноркурс-

ных фрагментов МРИ, геометрическое соответствие между которыми связано проективным преобразованием. В стандарте MPEG-4 и работах [18–20] проективное преобразование используется в объектно-ориентированном кодировании изображений на основе объектной компенсации движения, но только для синтетических видеоданных. Для проективного преобразования реальных МРИ необходима объектная декомпозиция и идентификация их разноракурсных фрагментов. Объектная компенсация движения на основе проективных преобразований отдельных элементов изображений позволяет существенно повысить коэффициент сжатия МРИ в сравнении с блочной, пиксельной и кадровой компенсацией движения, но имеет высокую вычислительную сложность. Краткий анализ рассмотренных задач показывает важную роль сегментации в их эффективном решении. Она является необходимым этапом для выделения проекций объектов при сегментной и объектной компенсации движения.

В настоящем издании рассматриваются два метода сегментации изображений, часто используемые в системах видеонаблюдения, – выращивания областей и разделения и слияния областей. Эти методы и некоторые алгоритмы на их основе описаны в первом разделе. Второй раздел посвящен развитию методов сегментации на основе областей с использованием древовидного кодирования, в нем приведены два алгоритма на основе окто- и квадродерева, направленные на повышение качества и скорости сегментации. Третий раздел содержит задания к практическим занятиям по сегментации изображений, основанные на теоретическом материале первого и второго разделов. Для каждого задания предлагаются шесть вариантов исходных данных и подробно описанный пример решения для одного из вариантов. Для сравнения результатов сегментации по различным вариантам и формирования обобщенного вывода каждое задание целесообразно выполнять в группе из пяти человек, закрепляя за каждым членом группы один из шести нерешенных вариантов. Задания рекомендуется выполнять последовательно, поскольку некоторые из них требуют сопоставления с результатами выполнения предыдущих заданий.

1. СЕГМЕНТАЦИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ ОБЛАСТЕЙ

1.1. Выращивание областей

Выращивание областей осуществляется путем добавления пикселей, значения которых соответствуют заданным условиям, к ранее выделенной области, начинающейся с некоторого начального пикселя роста [2]. Начальными пикселями роста могут быть специально выделяемые локальные экстремумы, гистограммные экстремумы или очередные необработанные пиксели (начальные пиксели роста предварительно не назначаются, а определяются в процессе сегментации).

Алгоритм выращивания областей состоит из следующих шагов.

1) Определение текущего значения n_s номера сегмента (при инициализации алгоритма $n_s \leftarrow 0$, при выборе нового начального пикселя роста $n_s \leftarrow n_s + 1$). Координаты (y, x) очередного начального пикселя роста помещаются в стеки $Y_F = \left\| y_F(p_F) \right\|_{(p_F=0, P_F-1)}$ и $X_F = \left\| x_F(p_F) \right\|_{(p_F=0, P_F-1)}$ координат смежных пикселей, где p_F – указатель стеков; P_F – максимально возможное число координат в стеках Y_F и X_F . Текущему элементу матрицы сегментации $s(y, x)$ присваивается значение n_s номера сегмента.

2) Реализация цикла обработки стеков Y_F и X_F , из которых извлекаются координаты (y, x) очередного обрабатываемого пикселя; проверка выполнения условия присоединения к текущему пикселю (y, x) смежных пикселей с координатами $(y + y', x + x')$ при $(y' = \overline{-1, 1}) \wedge (x' = \overline{-1, 1}) \wedge ((y' \neq 0) \vee (x' \neq 0))$, которым в матрице сегментации соответствуют нулевые элементы: $s(y + y', x + x') = 0$. Если для какого-либо смежного пикселя условие выполняется, то его координаты $(y + y', x + x')$ заносятся в стеки Y_F и X_F , а элементу матрицы сегментации с координатами $(y + y', x + x')$ присваивается значение текущего элемента матрицы сегментации, совпадающее с номером n_s сегмента: $s(y + y', x + x') \leftarrow s(y, x)$.

3) Шаги 1 и 2 повторяются до тех пор, пока все начальные пиксели роста не будут обработаны.

Результат сегментации тестового изображения с помощью выращивания областей приведен на рис. 1.1. Далее приведен краткий обзор модификаций алгоритма разделения и слияния областей.

В [21] предложен алгоритм, объединяющий выращивание областей с контурной обработкой, использующий априорную информацию о числе областей. Результат обнаружения границ используется для ограничения роста области. Пороговое значение локальной схожести постепенно увеличивается до тех пор, пока не будет получено ожидаемое количество областей.



Рис. 1.1. Сегментация с помощью метода выращивания областей:
a – исходное изображение; *б* – сегментированное изображение

В [22] сегментация на основе выращивания областей используется в комбинации с нечеткой логикой, предварительной медианной фильтрацией и цепочным кодированием границ областей (позволяет сократить объем информации о результатах сегментации).

В [23] используется анализ градиента для выделения необходимого контраста в районе границ, что позволяет повысить точность сегментации на основе выращивания областей.

Для выделения объектов на текстурном фоне в [24] предложен алгоритм, использующий примитивы объектов и фона для первоначального разделения изображения на множество мелких областей, выделения и удаления фоновой текстуры, уточнения границ сегментов.

В [25] сегментация на основе выращивания областей используется для грубого разбиения изображения, а затем метод диаграмм Вороного применяется для итеративной обработки, получения более четких границ и повышения точности сегментации.

В [26] представлен алгоритм, в котором в качестве начальных пикселей роста используются пиксели, имеющие наибольшую интенсивность по сравнению со средней интенсивностью пикселей в локальной окрестности.

В [27] описан алгоритм, в котором используется индекс подобия интенсивности и адаптивный порог Оцу для определения момента остановки роста области. Данный алгоритм получил развитие в работе [28], где предложены три критерия схожести для роста области: локальный, глобальный и относительный. Алгоритм отличается от базового алгоритма выращивания областей и алгоритма Оцу использованием многоэтапного выбора порога, учитывающего отношение яркости пикселя к его окрестности и среднему значению яркости выращиваемой области.

В [29] предложен алгоритм с локальным выбором порога для сегментации низкоконтрастных изображений.

Для сегментации спутниковых изображений дистанционного зондирования Земли высокого пространственного разрешения в [30] представлен алгоритм, использующий граф смежности и векторы признаков (девять компонентов для восьми направлений) для повышения точности сегментации.

В алгоритме [31] используется иерархическая обработка для объединения схожих рассредоточенных объектов спутниковых изображений.

Для повышения эффективности иерархической сегментации в алгоритме [32] используются операторы выделения границ Собеля, Превитта, Фрей – Чена.

Для сегментации цветных изображений в [33] предложена комбинация алгоритмов выращивания и нормализованного удаления [34] областей с преобразованием изображения из пространства RGB в пространство YCbCr.

В [35] для повышения точности сегментации медицинских изображений в алгоритме сегментации используется нечеткая логика для выбора начальных точек роста.

В [36] выбор начальных точек роста медицинских изображений в алгоритме сегментации осуществляется на основе анализа текстурных особенностей.

В [37] приведен алгоритм сегментации, который использует условие однородности, учитывающее морфологические и пространственные признаки. В данном алгоритме для повышения скорости вычислений каждой точке роста назначается отдельный поток.

В [38] для повышения точности сегментации сонарных изображений в алгоритме используются марковские случайные поля.

В [39] используется алгоритм выращивания областей для первичной сегментации томограмм печени. Затем алгоритмы водораздела и k -средних используются для удаления кластеров с высокими значениями интенсивности.

В [40] для сегментации мультиспектральных изображений дистанционного зондирования городских районов в алгоритме сегментации используется морфологическое дерево.

1.2. Разделение и слияние областей

Разделение и слияние областей осуществляется путем дробления изображения на мелкие однородные фрагменты и объединения их в более крупные однородные области. Однородность может оцениваться по яркости, цвету или текстуре.

Известен алгоритм разделения и слияния областей на основе квадродерева (рис. 1.2) [3]. Сначала сегментируемое изображение рассматривается как одна область. Если в результате ее сканирования обнаруживаются неоднородные элементы, то она разбивается на четыре одинаковые по площади подобласти (квадранта) с присвоением каждой из них своего номера (квадранты R_1, R_2, R_3, R_4 на рис. 1.3). Далее сканирование, проверка однородности пикселей, дробление и присвоение новых номеров повторяются в каждом квадранте (на рис. 1.3 квадрант R_4 дробится на квадранты $R_{41}, R_{42}, R_{43}, R_{44}$). Найденные при этом смежные однородные квадранты также проверяются на однородность и объединяются в одну область с присвоением единого номера при выполнении данного критерия. Это является причиной высокой вычислительной сложности алгоритма. Неполная реализация данного шага приводит к пересегментации изображений, содержащих однородные области сложной формы, отдельным фрагментам которых могут быть присвоены различные номера.

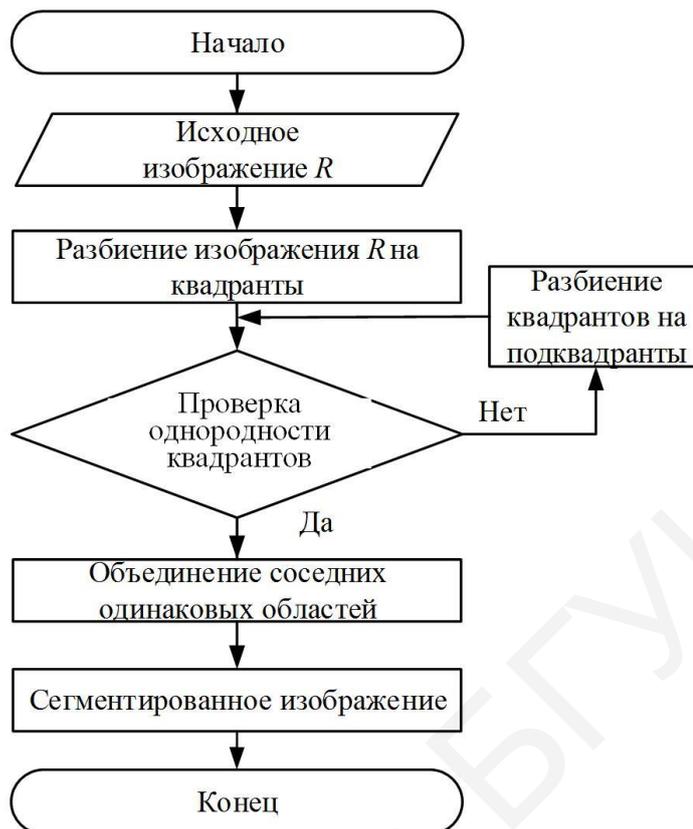


Рис. 1.2. Алгоритм разделения и слияния областей на основе квадродерева

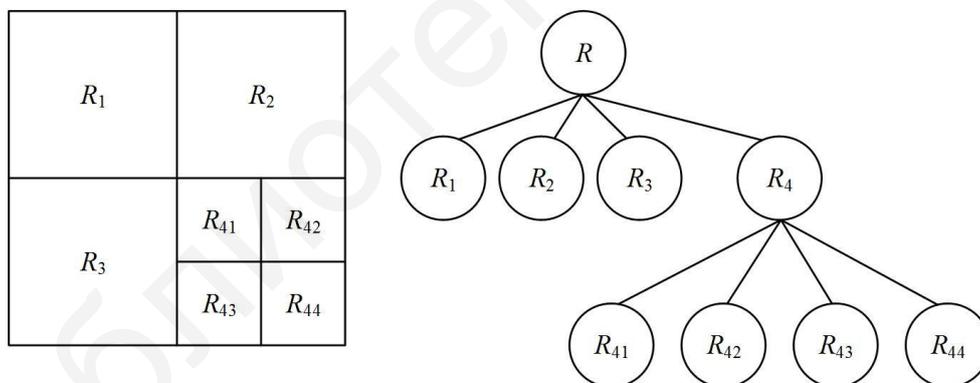


Рис. 1.3. Схема сегментации изображения и формирования квадродерева

На рис. 1.4 приведены исходное изображение и границы выделенных на нем однородных квадрантов. Алгоритм квадродерева лежит в основе большинства известных подходов к реализации сегментации на основе разделения и слияния областей. Большинство модификаций базового алгоритма ориентированы на преодоление его основного недостатка, связанного с пересегментацией. Это достигается за счет роста вычислительной сложности. Далее приведен краткий обзор модификаций алгоритма разделения и слияния областей.

В [41] предложен алгоритм разделения и слияния областей на основе квадродерева с адаптивным порогом для фрактального сжатия изображений. Сжатие достигается за счет уменьшения количества областей.

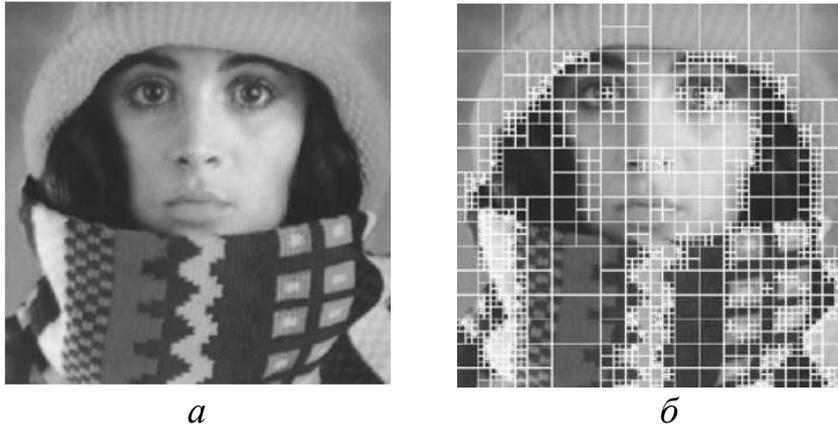


Рис. 1.4. Разделение и слияние областей на основе квадродерева:
a – исходное изображение; *б* – границы областей

В [42] представлен алгоритм сегментации изображений дистанционного зондирования Земли, содержащих преимущественно лесные участки. Алгоритм основан на разделении и слиянии областей с помощью квадродерева и многомасштабных вероятностных моделях лесных массивов. Алгоритм имеет высокую вычислительную сложность и дает большую ошибку сегментации на изображениях других типов.

В [43] описан гибридный алгоритм сегментации и распознавания объектов изображения на основе разделения, слияния областей и графов.

Алгоритм разделения и слияния областей на основе квадродерева, приведенный в [44], позволяет повысить точность сегментации за счет использования топологических и графотеоретических характеристик изображений.

В [45] представлен алгоритм разделения и слияния областей на основе квадродерева, использующий проходы «сверху вниз» и «снизу вверх» для первичного разделения изображения, инициализации списка соседей и объединения областей с учетом их топологического расположения. Алгоритм позволяет повысить скорость и точность сегментации, но не обеспечивает прерывание обработки для получения промежуточных результатов сегментации.

В [46] приведен алгоритм разделения и слияния областей цветных изображений, использующий векторы признаков и кластеризацию пикселей с учетом цвета и текстуры, позволяющий удалять малые изолированные области.

Для сегментации изображений дистанционного зондирования Земли в [47] представлен комбинированный алгоритм на основе разделения и слияния областей, нечеткой кластеризации и морфологической обработки с использованием операций размывания и наращивания. Алгоритм позволяет избавиться от небольших замкнутых областей, но значительно искажает размеры сегментов.

В [48] описан алгоритм, основанный на разделении и слиянии областей и вероятностном графе для ускорения и повышения точности сегментации медицинских изображений с высоким и низким разрешением.

В [49] приведен алгоритм сегментации изображений с возможностью обнаружения объектов по порогу яркости. Алгоритм использует квадродерево, формируемое в результате объединения пикселей в суперпиксели.

2. СЕГМЕНТАЦИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ ДРЕВОВИДНЫХ СТРУКТУР

2.1. Волновое выращивание областей на основе октодерев

В [50, 51] предложен алгоритм сегментации изображений на основе древовидно-волнового выращивания областей (WRG – Wave Region Growing). Сущность алгоритма заключается в использовании октодерев при поиске одинаковых равноудаленных пикселей, что обеспечивает разделение областей с плавным перепадом яркости, которые другие алгоритмы сегментируют с ошибками.

Алгоритм пиксельной сегментации изображений на основе древовидно-волнового выращивания областей состоит из следующих основных шагов.

1) Буферизация изображения $P = \left\| p(y, x) \right\|_{(y=0, \overline{Y-1}, x=0, \overline{X-1})}$ размером YX пикселей и определение значения порога Δ_G для присоединения пикселя к выращиваемой области. Формирование матрицы сегментации $S = \left\| s(y, x) \right\|_{(y=0, \overline{Y-1}, x=0, \overline{X-1})}$, элементы которой определяются с помощью выражения $s(y, x) \leftarrow 0$ при $y = \overline{0, Y-1}, x = \overline{0, X-1}$.

2) Начало цикла сегментации. Выбор начальных точек роста областей. Пусть матрицы $BM_Y = \left\| bm_Y(k) \right\|_{(k=0, \overline{K_{BM}-1})}$, $BM_X = \left\| bm_X(k) \right\|_{(k=0, \overline{K_{BM}-1})}$ содержат координаты начальных точек роста, где K_{BM} – число начальных точек роста.

3) Инициализация стеков $\{GM_Y(k)\}_{(p=0, \overline{K_{BM}-1})}$, $\{GM_X(k)\}_{(p=0, \overline{K_{BM}-1})}$ роста областей, $GM_Y(k) = \left\| gm_Y(k, p(k)) \right\|_{(p(k)=0, \overline{P_{GM}(k)-1})}$, $GM_X(k) = \left\| gm_X(k, p(k)) \right\|_{(p(k)=0, \overline{P_{GM}(k)-1})}$.

Число стеков совпадает с числом начальных точек роста. Стеки инициализируются координатами начальных точек роста: $gm_Y(k, 0) \leftarrow bm_Y(k)$, $gm_X(k, 0) \leftarrow bm_X(k)$ при $k = \overline{0, K_{BM}-1}$. Указатель каждого стека устанавливается в значение 1: $p(k) \leftarrow 1$ при $k = \overline{0, K_{BM}-1}$. Элементам матрицы сегментации, координаты которых соответствуют координатам начальных точек роста, присваиваются номера сегментов (каждому элементу присваивается неиспользуемый ранее номер): $s(bm_Y(k), bm_X(k)) \leftarrow (k+1)$ при $k = \overline{0, K_{BM}-1}$.

4) Инициализация счетчика циклов перебора выращиваемых областей: $k \leftarrow 0$.

5) Начало цикла перебора выращиваемых областей.

Из стеков роста областей, номер которых соответствует значению счетчика циклов перебора выращиваемых областей, извлекаются координаты текущего выращиваемого пикселя, на который указывает значение соответствующего указателя стека. Перед этим значение указателя стека уменьшается на единицу:

$p(k) \leftarrow p(k) - 1$, $y_B \leftarrow gm_y(k, p(k))$, $x_B \leftarrow gm_x(k, p(k))$. Если стек пуст ($p(k) = 0$), область не сегментируется.

6) Инициализация счетчика окрестных пикселей $l \leftarrow 0$.

7) Начало цикла анализа окрестных пикселей. На основе координат текущего выращиваемого пикселя вычисляются координаты (y_A, x_A) текущего окрестного пикселя, номер которого определяется значением счетчика окрестных пикселей: $y_A = y_B + \lceil l/3 \rceil$, $x_A = y_B + (l - 3y_A)$, где $\lceil \cdot \rceil$ – операция округления с избытком.

8) Проверка на нуль значения элемента матрицы сегментации, координаты которого соответствуют найденным координатам (y_A, x_A) окрестного пикселя. Если это значение не равно нулю ($s(y_A, x_A) \neq 0$), то переход на шаг 11, иначе – переход на следующий шаг.

9) Сравнение абсолютного значения разности значений текущего выращиваемого пикселя $i(y_B, x_B)$ и текущего окрестного пикселя $i(y_A, x_A)$ с заданным порогом Δ_G . Если абсолютное значение разности меньше порога (т. е. $|p(y_B, x_B) - p(y_A, x_A)| \leq \Delta_G$), окрестный пиксель должен быть присоединен к области: $s(y_A, x_A) \leftarrow s(y_B, x_B)$; иначе – переход на шаг 11.

10) Занесение в текущий стек роста области координат (y_A, x_A) текущего окрестного пикселя: $gm_y(k, p(k)) \leftarrow y_A$, $gm_x(k, p(k)) \leftarrow x_A$. При этом указатель текущего стека роста области увеличивается на единицу: $p(k) \leftarrow p(k) + 1$.

11) Окончание цикла анализа окрестных пикселей. Счетчик окрестных пикселей увеличивается на единицу: $l \leftarrow l + 1$. Проверяется неравенство значения счетчика окрестных пикселей и числа окрестных пикселей (восемь пикселей). Если счетчик окрестных пикселей меньше 8 ($l < 8$), то осуществляется переход на шаг 7, иначе – выход из цикла.

12) Окончание цикла перебора выращиваемых областей. Счетчик циклов перебора выращиваемых областей увеличивается на единицу: $k \leftarrow k + 1$. Проверяется неравенство значения счетчика циклов перебора выращиваемых областей и числа K_{BM} начальных точек роста. Если условие выполняется – переход на шаг 5, иначе – выход из цикла.

13) Окончание цикла сегментации. Проверка условия $\sum_{k=0}^{K_{BM}} p(k) = 0$. Если условия не выполняются – переход на шаг 2, иначе (стеки пусты) – выход из цикла и окончание алгоритма.

В результате выполнения данного алгоритма формируется матрица сегментации, значение каждого элемента которой указывает на номер сегмента, которому принадлежит соответствующий пиксель сегментируемого изображения. С каждым циклом перебора выращиваемых областей размеры сегментов постепенно увеличиваются, в чем проявляется прогрессивный характер сегментации. В случае

прерывания алгоритма (при ограниченном времени сегментации) часть изображения останется несегментированной, однако все обрабатываемые области будут равномерно сегментированы.

2.2. Сегментация изображений на основе квадродерева

В [52, 53] предложен алгоритм сегментации изображений на основе прогрессивного квадродерева (PQT – Progressive Quadra Tree). Сущность алгоритма состоит во вложенном кодировании структуры квадродерева, описывающего положения и формы сегментов. Предлагаемый алгоритм отличается от базового алгоритма сегментации на основе разделения и слияния областей:

а) древовидной кластеризацией однородных по яркости областей пикселей и формированием множества кратномасштабных кластерных образов исходного изображения (прямая кластеризация);

б) присвоением номеров кластеризованным однородным областям на всех уровнях кратномасштабного представления исходного изображения и поиском избыточных границ однородных областей (прогрессивная обратная кластеризация);

в) объединением соседних однородных по яркости кластеризованных областей (уточнение границ сегментов).

В алгоритме PQT используется строгое равенство при определении схожести яркости смежных пикселей. Поэтому для сокращения числа различных по значению пикселей, уменьшения числа и увеличения площади однородных областей изображения перед сегментацией необходимо осуществить квантование.

Прямая кластеризация

Алгоритм прямой кластеризации состоит из следующих шагов.

1) Формирование множества $\{A(l)\}_{(l=0,\overline{L})}$ матриц

$A(l) = \left\| a^{(l)}(y, x) \right\|_{(y=0, \overline{Y/2^l-1}, x=0, \overline{X/2^l-1})}$ аппроксимации и инициализация элементов матрицы $A(0)$ аппроксимации 0-го уровня: $a^{(0)}(y, x) \leftarrow p(y, x)$ при $y = \overline{0, Y-1}$,

$x = \overline{0, X-1}$, где \leftarrow – операция присваивания; $p(y, x)$ – пиксель сегментируемого изображения $P = \left\| p(y, x) \right\|_{(y=0, \overline{Y-1}, x=0, \overline{X-1})}$; $Y = 2^{f_y}$, $X = 2^{f_x}$ – размеры сегментируемого изображения P ; $f_y > 0$, $f_x > 0$ – целые; $l = \overline{0, L}$ – номер итерации (уровня) сегментации; $L = \min(f_y, f_x)$ – число итераций, определяемое минимальным из значений f_y и f_x . В качестве аппроксимированного образа $A(0)$ используется сегментируемое изображение P .

2) Формирование множества $\{C(l)\}_{(l=0,\overline{L})}$ матриц

$C(l) = \left\| c^{(l)}(y, x) \right\|_{(y=0, \overline{Y/2^l-1}, x=0, \overline{X/2^l-1})}$ кластеризации и инициализация элементов матрицы

$C(0)$ кластеризации нулевого уровня: $c^{(0)}(y,x) \leftarrow 0$ при $y = \overline{0, Y-1}$, $x = \overline{0, X-1}$.
 В результате матрица $C(0)$ кластеризации нулевого уровня определяется нулевой.

3) Инициализация счетчика l циклов: $l \leftarrow 1$.

4) Начало цикла кластеризации. Формирование матрицы $C(l)$ кластеризации l -го уровня (рис. 2.1), элементы которой вычисляются с помощью выражений:

$$\forall (j = \overline{0,1}) \forall (i = \overline{0,1}) (a^{(l-1)}(2y+j, 2x+i) = a^{(l)}(y,x) \wedge (c^{(l-1)}(2y+j, 2x+i) = 0) \Rightarrow (c^{(l)}(y,x) \leftarrow 0), \quad (2.1)$$

$$\exists (j = \overline{0,1}) \exists (i = \overline{0,1}) (a^{(l-1)}(2y+j, 2x+i) \neq a^{(l)}(y,x) \vee (c^{(l-1)}(2y+j, 2x+i) = 1) \Rightarrow (c^{(l)}(y,x) \leftarrow 1) \quad (2.2)$$

при $y = \overline{0, Y/2^l - 1}$, $x = \overline{0, X/2^l - 1}$,

где $a^{(l)}(y,x)$ – среднее арифметическое элементов кластера с координатами $(2y, 2x)$ в матрице $A(l-1)$ аппроксимации нижнего $(l-1)$ -го уровня (рис. 2.2),

$$a^{(l)}(y,x) = \frac{1}{4} \sum_{j=0}^1 \sum_{i=0}^1 a^{(l-1)}(2y+j, 2x+i).$$

5) Приращение счетчика циклов: $l \leftarrow l + 1$.

6) Окончание цикла кластеризации. Проверка условия $l \leq L$. Если оно выполняется – переход на шаг 4, иначе – выход из цикла и завершение алгоритма.

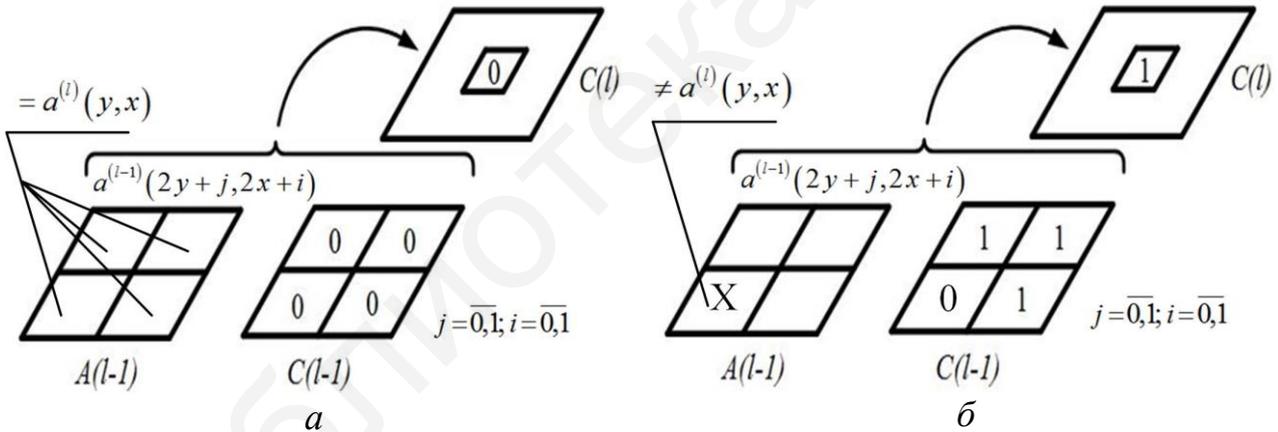


Рис. 2.1. Схема формирования матрицы кластеризации:
 a – для нулевого кластера; b – для ненулевого кластера

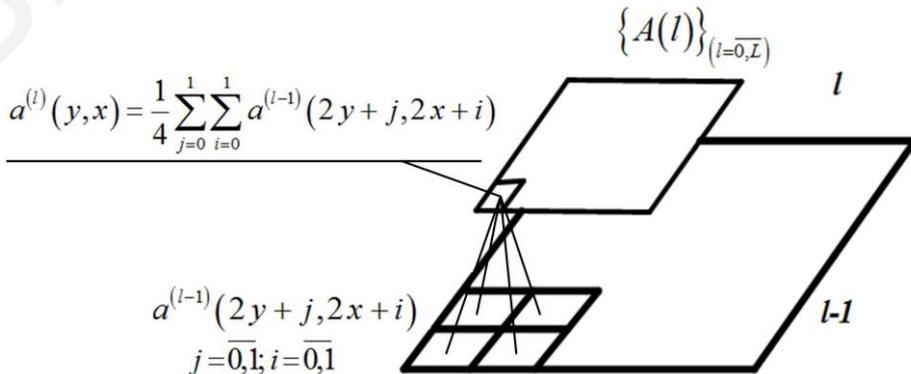


Рис. 2.2. Схема вычисления среднего арифметического элементов кластера

Прогрессивная обратная кластеризация

Алгоритм прогрессивной обратной кластеризации состоит из следующих шагов.

1) Формирование множества $\{S(l)\}_{(l=0,\overline{L})}$ матриц $S(l) = \left\| s^{(l)}(y,x) \right\|_{(y=0,\overline{Y/2^l-1}, x=0,\overline{X/2^l-1})}$

сегментации и множества $\{E(l)\}_{(l=0,\overline{L})}$ матриц $E(l) = \left\| e^{(l)}(y,x) \right\|_{(y=0,\overline{Y/2^l-1}, x=0,\overline{X/2^l-1})}$ границ однородных областей. Инициализация элементов матриц $S(l)$ сегментации и $E(l)$ границ однородных областей уровней $\overline{0}, \overline{L}$: $s^{(l)}(y,x) \leftarrow 0$ и $e^{(l)}(y,x) \leftarrow 1$ при $\overline{l=0}, \overline{L}$, $y = \overline{0}, \overline{Y/2^l-1}$, $x = \overline{0}, \overline{X/2^l-1}$. В результате выполнения данного шага матрицы $S(l)$ сегментации и $E(l)$ границ однородных областей уровней $\overline{0}, \overline{L}$ определяются нулевой и единичной соответственно.

2) Инициализация счетчика N_A однородных областей: $N_A \leftarrow 1$.

3) Инициализация матриц $S(L) = \left\| s^{(L)}(y,x) \right\|_{(y=0,x=0)}$ сегментации и

$E(L) = \left\| e^{(L)}(y,x) \right\|_{(y=0,x=0)}$ границ однородных областей L -го уровня, значения единственных элементов которых (вершин деревьев) вычисляются с помощью выражения

$$\left(c^{(L)}(0,0) = 0 \right) \Rightarrow \left(s^{(L)}(0,0) \leftarrow N_A, N_A \leftarrow N_A + 1 \right). \quad (2.3)$$

Из выражения (2.3) следует, что для однородного изображения $s^{(L)}(0,0) = 1$, а для неоднородного $s^{(L)}(0,0) = 0$. Для обоих вариантов $e^{(L)}(0,0) = 1$.

4) Инициализация счетчика l циклов: $l = L$.

5) Начало цикла прогрессивной сегментации. Формирование значений элементов матрицы $S(l-1)$ сегментации $(l-1)$ -го уровня с помощью выражения

$$\left(c^{(l)}(y,x) = 0 \right) \Rightarrow \left(s^{(l-1)}(2y+j, 2x+i) \leftarrow s^{(l)}(y,x) \right) \quad (2.4)$$

при $y = \overline{0}, \overline{Y/2^l-1}$, $x = \overline{0}, \overline{X/2^l-1}$, $j = \overline{0}, \overline{1}$, $i = \overline{0}, \overline{1}$.

В результате формируется $(l-1)$ -й уровень для кластерных нуль-деревьев.

Возможны четыре комбинации соответствующих значений матрицы кластеризации на l -м и $(l-1)$ -м уровнях. Для каждой из них предполагается следующая обработка на $(l-1)$ -м уровне: $(0,0)$ – масштабирование области (кластер $(l-1)$ -го уровня наследует номер сегмента соответствующего элемента l -го уровня); $(1,0)$ – формирование нового сегмента (элемент $(l-1)$ -го уровня получает новый номер сегмента) или присоединение к существующему соседнему сегменту (элемент $(l-1)$ -го уровня получает номер соседнего элемента $(l-1)$ -го уровня); $(1,1)$ – не обрабатывается; $(0,1)$ – невозможная комбинация.

6) Формирование новых областей (разделение областей) по выражению

$$\begin{aligned}
& (c^{(l)}(y, x) = 1) \wedge (c^{(l-1)}(2y + j, 2x + i) = 0) \wedge \\
& \wedge \neg \exists (k \in [-1, 1]) \neg \exists (m \in [-1, 1]) \left(\begin{array}{l} a^{(l-1)}(2y + j, 2x + i) = \\ = a^{(l-1)}(2y + j + k, 2x + i + m) \wedge \\ \wedge s^{(l-1)}(2y + j + k, 2x + i + m) \neq 0 \end{array} \right) \Rightarrow \quad (2.5) \\
& \Rightarrow (s^{(l-1)}(2y + j, 2x + i) \leftarrow N_A, N_A \leftarrow N_A + 1)
\end{aligned}$$

при $y = \overline{0, Y/2^l - 1}, x = \overline{0, X/2^l - 1}, j = \overline{0, 1}, i = \overline{0, 1}, k = \overline{-1, 1}, m = \overline{-1, 1}, |k| + |m| \neq 0$.

7) Выращивание областей в результате их присоединения к существующим однородным областям согласно выражению

$$\begin{aligned}
& (c^{(l)}(y, x) = 1) \wedge (c^{(l-1)}(2y + j, 2x + i) = 0) \wedge (s^{(l-1)}(2y + j, 2x + i) = 0) \wedge \\
& \wedge \exists (k \in [-1, 1]) \exists (l \in [-1, 1]) \left(\begin{array}{l} a^{(l-1)}(2y + j, 2x + i) = \\ = a^{(l-1)}(2y + j + k, 2x + i + m) \wedge \\ \wedge s^{(l-1)}(2y + j + k, 2x + i + m) \neq 0 \end{array} \right) \Rightarrow \quad (2.6) \\
& \Rightarrow (s^{(l-1)}(2y + j, 2x + i) \leftarrow s^{(l-1)}(2y + j + k, 2x + i + m))
\end{aligned}$$

при $y = \overline{0, Y/2^l - 1}, x = \overline{0, X/2^l - 1}, j = \overline{0, 1}, i = \overline{0, 1}, k = \overline{-1, 1}, m = \overline{-1, 1}, |k| + |m| \neq 0$.

8) Пространственно-ориентированный поиск правых и нижних границ однородных областей на уровне l в соответствии с выражениями:

$$(c^{(l)}(y, x) = 1) \wedge (c^{(l-1)}(2y + j, 2x + i) = 0) \Rightarrow (e^{(l-1)}(2y + j, 2x + i) \leftarrow 4), \quad (2.7)$$

$$(e^{(l)}(y, x) = 4) \Rightarrow \left(\begin{array}{l} e^{(l-1)}(2y, 2x) \leftarrow 0, e^{(l-1)}(2y, 2x + 1) \leftarrow 11, \\ e^{(l-1)}(2y + 1, 2x) \leftarrow 22, e^{(l-1)}(2y + 1, 2x + 1) \leftarrow 3 \end{array} \right), \quad (2.8)$$

$$(e^{(l)}(y, x) = 0) \Rightarrow \left(\begin{array}{l} e^{(l-1)}(2y, 2x) \leftarrow 0, e^{(l-1)}(2y, 2x + 1) \leftarrow 0, \\ e^{(l-1)}(2y + 1, 2x) \leftarrow 0, e^{(l-1)}(2y + 1, 2x + 1) \leftarrow 0 \end{array} \right), \quad (2.9)$$

$$(e^{(l)}(y, x) = 11) \Rightarrow \left(\begin{array}{l} e^{(l-1)}(2y, 2x) \leftarrow 0, e^{(l-1)}(2y, 2x + 1) \leftarrow 11, \\ e^{(l-1)}(2y + 1, 2x) \leftarrow 0, e^{(l-1)}(2y + 1, 2x + 1) \leftarrow 11 \end{array} \right), \quad (2.10)$$

$$(e^{(l)}(y, x) = 22) \Rightarrow \left(\begin{array}{l} e^{(l-1)}(2y, 2x) \leftarrow 0, e^{(l-1)}(2y, 2x + 1) \leftarrow 0, \\ e^{(l-1)}(2y + 1, 2x) \leftarrow 22, e^{(l-1)}(2y + 1, 2x + 1) \leftarrow 21 \end{array} \right), \quad (2.11)$$

$$(e^{(l)}(y, x) = 21) \Rightarrow \left(\begin{array}{l} e^{(l-1)}(2y, 2x) \leftarrow 0, e^{(l-1)}(2y, 2x + 1) \leftarrow 0, \\ e^{(l-1)}(2y + 1, 2x) \leftarrow 21, e^{(l-1)}(2y + 1, 2x + 1) \leftarrow 21 \end{array} \right), \quad (2.12)$$

$$\left(e^{(l)}(y, x) = 3 \right) \Rightarrow \left(\begin{array}{l} e^{(l-1)}(2y, 2x) \leftarrow 0, e^{(l-1)}(2y, 2x+1) \leftarrow 11, \\ e^{(l-1)}(2y+1, 2x) \leftarrow 21, e^{(l-1)}(2y+1, 2x+1) \leftarrow 3 \end{array} \right). \quad (2.13)$$

Выражения (2.7)–(2.13) описывают процедуру пространственно-ориентированного поиска границ однородных областей. Комбинации значений $\left\{ \left(c^{(l)}(y, x) = 0 \right), \left(c^{(l-1)}(2y + j, 2x + i) = 1 \right) \right\}$ и $\left\{ \left(e^{(l)}(y, x) = 0 \right), \left(e^{(l-1)}(2y + j, 2x + i) = 1 \right) \right\}$ согласно этим выражениям представлены на рис. 2.3.

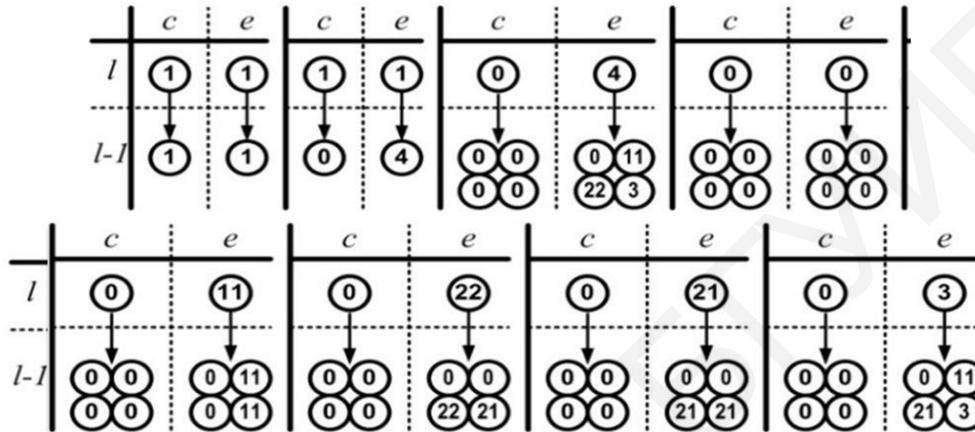


Рис. 2.3. Комбинации значений элементов в матрицах кластеризации и выделения границ областей

9) Инициализация матриц $N_B = \|n_B(p, q)\|_{(p=0, N_A-1, q=0, M_A-1)}$ номеров и количества $V_B = \|v_B(p)\|_{(p=0, N_A-1)}$ смежных одинаковых областей согласно выражениям $n_B(p, q) \leftarrow 0, v_B(p) \leftarrow 0$ при $p = \overline{0, N_A - 1}, q = \overline{0, M_A - 1}$, где M_A – максимальное число смежных одинаковых областей.

10) Слияние однородных областей согласно выражению

$$\left(\left(e^{(l)}(y, x) = 1 \right) \vee \left(e^{(l)}(y, x) > 1 \right) \wedge \left(e^{(l-1)}(2y + j, 2x + i) > 0 \right) \right) \wedge \left(\begin{array}{l} a^{(l-1)}(2y + j, 2x + i) = \\ = a^{(l-1)}(2y + j + k, 2x + i + m) \wedge \\ \wedge s^{(l-1)}(2y + j + k, 2x + i + m) \neq 0 \wedge \\ \wedge s^{(l-1)}(2y + j + k, 2x + i + m) \neq \\ \neq s^{(l-1)}(2y + j, 2x + i) \wedge \\ \wedge \neg \exists \left(q \in \left[0, v_B \left(s^{(l-1)}(2y + j, 2x + i) \right) \right] \right) \\ n_B \left(s^{(l-1)}(2y + j, 2x + i), q \right) = \\ = s^{(l-1)}(2y + j + k, 2x + i + m) \end{array} \right) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \left(\begin{array}{l} n_B \left(s^{(l-1)}(2y+j, 2x+i), v_B \left(s^{(l-1)}(2y+j, 2x+i) \right) \right) \leftarrow \\ \leftarrow s^{(l-1)}(2y+j+k, 2x+i+m), \\ v_B \left(s^{(l-1)}(2y+j, 2x+i) \right) \leftarrow v_B \left(s^{(l-1)}(2y+j, 2x+i) \right) + 1, \\ n_B \left(\begin{array}{l} s^{(l-1)}(2y+j+k, 2x+i+m), \\ v_B \left(s^{(l-1)}(2y+j+k, 2x+i+m) \right) \end{array} \right) \leftarrow s^{(l-1)}(2y+j, 2x+i), \\ v_B \left(s^{(l-1)}(2y+j+k, 2x+i+m) \right) \leftarrow \\ \leftarrow v_B \left(s^{(l-1)}(2y+j+k, 2x+i+m) \right) + 1 \end{array} \right) \quad (2.14)$$

при $y = \overline{0}, Y/2^l - 1, x = \overline{0}, X/2^l - 1, j = \overline{0}, 1, i = \overline{0}, 1,$

$$k = \begin{cases} \overline{0}, 1 \text{ при } e^{(l-1)}(2y+j, 2x+i) = \{1, 3, 4\}, \\ 0 \text{ при } e^{(l-1)}(2y+j, 2x+i) = 11, \\ 1 \text{ при } e^{(l-1)}(2y+j, 2x+i) = \{21, 22\}, \end{cases} \quad m = \begin{cases} \overline{-1}, 1 \text{ при } e^{(l-1)}(2y+j, 2x+i) = \{1, 4\}, \\ \overline{-1}, 0 \text{ при } e^{(l-1)}(2y+j, 2x+i) = 22, \\ 0 \text{ при } e^{(l-1)}(2y+j, 2x+i) = 21, \\ \overline{0}, 1 \text{ при } e^{(l-1)}(2y+j, 2x+i) = 3, \\ 1 \text{ при } e^{(l-1)}(2y+j, 2x+i) = 11, \end{cases}$$

$k + m \neq -1$ при $e^{(l-1)}(2y+j, 2x+i) = \{1, 4\},$

$|k| + |m| \neq 0$ при $e^{(l-1)}(2y+j, 2x+i) = \{1, 3, 4\}.$

Ограничения, накладываемые на индексы k и m , определяют конфигурации пространства поиска значимых элементов в матрице и $S(l-1)$ (рис. 2.4).

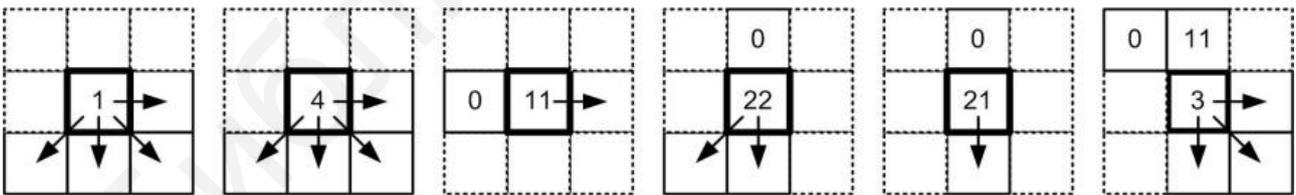


Рис. 2.4. Конфигурации пространства поиска значимых элементов в матрице $S(l-1)$

11) Уменьшение счетчика циклов: $l \leftarrow l - 1.$

12) Окончание цикла. Проверка условия $(l > 0)$. Если условие выполняется – переход на шаг 5, иначе – выход из цикла и завершение алгоритма.

Уточнение границ сегментов

В результате уточнения границ сегментов формируется результирующая матрица сегментации, размер которой совпадает с размером исходного изображения или кратен ему. Каждый элемент результирующей матрицы представляет не-

который пиксель изображения или его кратномасштабного представления и равен номеру соответствующего сегмента.

Алгоритм уточнения границ сегментов состоит из следующих шагов.

1) Формирование номеров изолированных однородных областей по выражению $\exists(p \in [0, N_A])(v_B(p) = 0) \Rightarrow ((n_X(N_S, 0) \leftarrow p), (n_C(p) \leftarrow N_S), (N_S \leftarrow N_S + 1))$ (2.15) при $p = \overline{0, N_A - 1}$,

где N_X – матрица номеров объединяемых областей, $N_X = \|n_X(p, q)\|_{(p=\overline{0, N_A-1}, q=\overline{0, M_A-1})}$;

N_C – матрица замены номеров объединяемых областей, $N_C = \|n_C(p)\|_{(p=\overline{0, N_A-1})}$;

N_S – счетчик номеров сегментов (при инициализации $N_S \leftarrow 0$).

2) Определение номера первой объединяемой области по выражению

$$(n_X(N_S, 0) \leftarrow p), (v_X(N_S) \leftarrow 1), (n_C(p) \leftarrow N_S), \quad (2.16)$$

где V_X – матрица количества объединяемых областей, $V_X = \|v_X(p)\|_{(p=\overline{0, N_A-1})}$.

3) Обработка стека согласно выражениям:

$$\begin{aligned} & \neg \exists(t \in [0, v_X(N_S) - 1])(n_X(N_S, t) = n_B(n_X(N_S, s), q)) \Rightarrow \\ & \Rightarrow \left(\begin{array}{l} n_X(N_S, v_X(N_S) + 1) \leftarrow n_B(n_X(N_S, s), q), \\ v_X(N_S) \leftarrow v_X(N_S) + 1, \\ n_C(n_B(n_X(N_S, s), q)) \leftarrow N_S \end{array} \right) \end{aligned} \quad (2.17)$$

при $q = \overline{0, v_B(n_X(N_S, s)) - 1}$,

$$v_B(n_X(N_S, s)) \leftarrow 0, \quad (2.18)$$

где s – указатель стека связанных номеров областей (при инициализации $s \leftarrow 0$).

4) Формирование результирующей матрицы $S_R = \|s_R(y, x)\|_{(y=\overline{0, Y-1}, x=\overline{0, X-1})}$ сегментации в результате переопределения номеров однородных областей согласно выражению

$$s_R(y, x) \leftarrow n_C(s^{(0)}(y, x)) \quad (2.19)$$

при $y = \overline{0, Y - 1}$, $x = \overline{0, X - 1}$.

Алгоритм RQT пиксельной сегментации изображений на основе древовидного разделения и слияния областей, как и алгоритм RG выращивания областей, обеспечивает полное и точное выделение однородных областей, а также многомасштабное представление сегментированного изображения. На рис. 2.5 приведены исходное, квантованное и сегментированные на четырех уровнях изображения. Квантование позволяет управлять числом сегментов на всех уровнях представления.

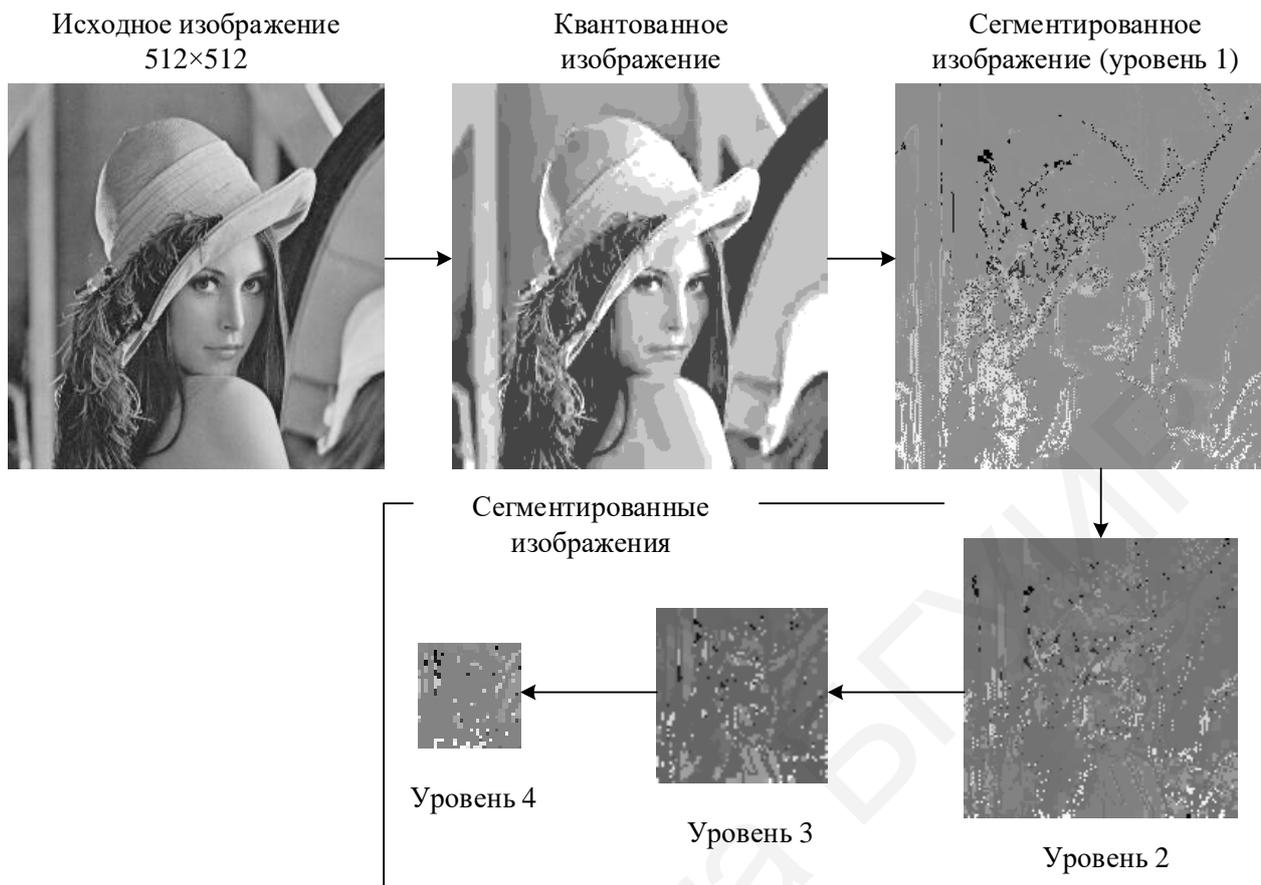


Рис. 2.5. Многомасштабное представление сегментированного изображения

3. ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАДАНИЯ ПО СЕГМЕНТАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

3.1. Практические задания по выращиванию областей

3.1.1. Для изображений $P = \|p(y, x)\|_{(y=0, \bar{7}, x=0, \bar{7})}$, приведенных на рис. 3.1 и содержащих пиксели из трех диапазонов яркости [0,9], [10,19], [20,29], выбрать пороговое значение Δp для условия $|p(y, x) - p(y + y', x + x')| \leq \Delta p$ присоединения пикселей к области ($p(y, x)$ – текущий пиксель, $p(y + y', x + x')$ – смежный пиксель, $y' = \{-1, 0, 1\}$, $x' = \{-1, 0, 1\}$), порядок выборки смежных пикселей в окрестности текущего пикселя, порядок выборки новых пикселей роста на изображении, способ назначения начальных пикселей роста, тип стеков Y_F и X_F координат смежных пикселей (FIFO или LIFO) и порядок их работы, построить временные диаграммы работы стеков координат смежных пикселей (привести значения элементов стеков Y_F и X_F , значения указателя стека p_F для каждого обрабатываемого пикселя $p(y, x)$), сформировать матрицу сегментации $S = \|s(y, x)\|_{(y=0, 2^{3-l}-1, x=0, 2^{3-l}-1)}$ по алгоритму выращивания областей RG, приведенному в подразд. 1.1.

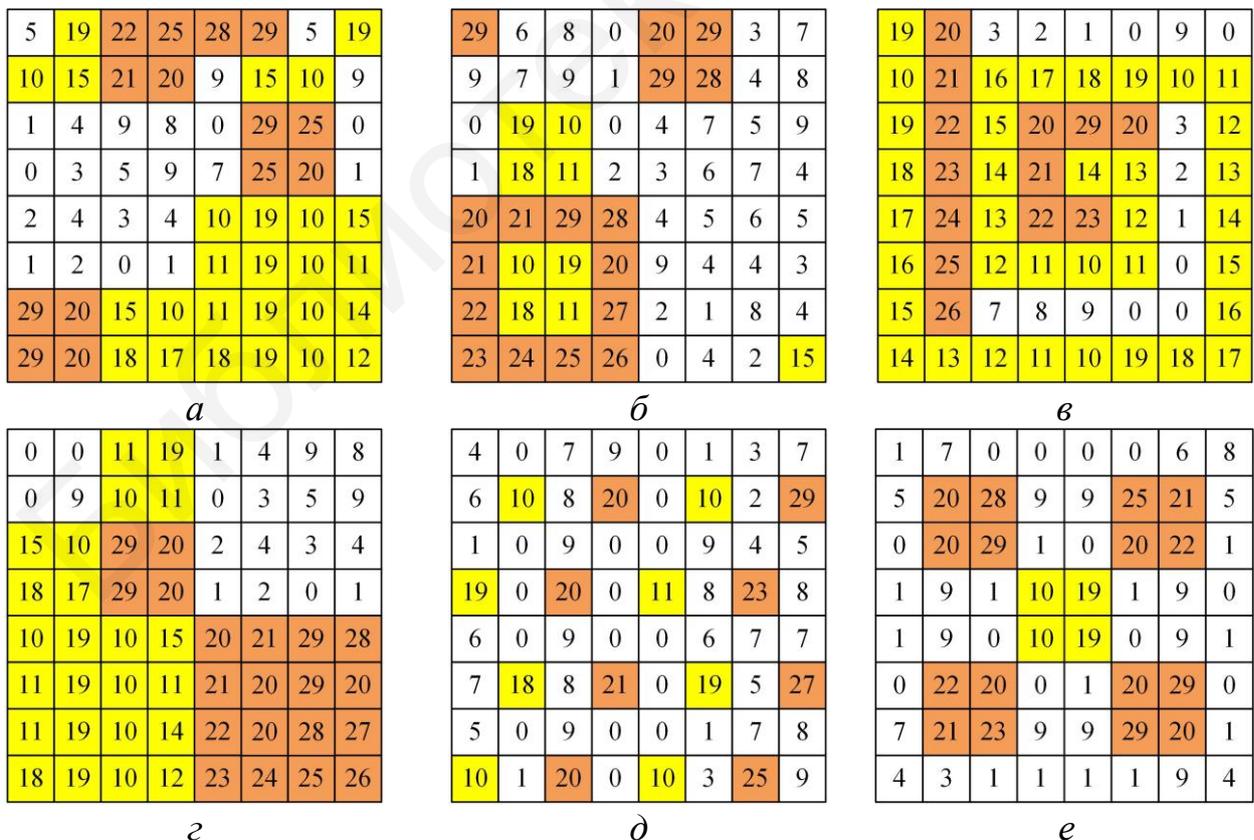


Рис. 3.1. Тестовые изображения:
 а – P1; б – P2; в – P3; г – P4; д – P5; е – P6

Изменяются ли значения матрицы сегментации и границы сегментов при изменении: а) порядка выборки смежных пикселей в окрестности текущего пикселя; б) порядка выборки новых пикселей роста; в) способа назначения начальных пикселей роста; г) типа стеков координат смежных пикселей и порядка их работы?

Пример решения задачи для изображения $P1$, приведенного на рис. 3.1, а:

1) Пусть: значение порога $\Delta p = 5$; порядок выборки смежных пикселей в окрестности текущего пикселя происходит по часовой стрелке относительно правого верхнего угла области смежных пикселей; порядок выборки новых пикселей роста на изображении происходит слева направо, сверху вниз; начальные пиксели роста заранее не назначаются; тип стеков Y_F и X_F для загрузки координат смежных пикселей – FIFO; стеки Y_F и X_F заполняются справа налево; нумерация элементов стека начинается с нуля; первый (выгружаемый) элемент стека расположен в стеке всегда справа в позиции 0; после выгрузки очередного элемента стек сдвигается вправо (\vec{Y}_F, \vec{X}_F); указатель стека p_F определяет свободную позицию в стеке для записи; после записи в стек указатель увеличивается; перед выгрузкой из стека указатель стека уменьшается; последний загруженный в стек элемент расположен всегда слева в позиции $p_F - 1$.

2) Инициализация номера сегментов: $n_S \leftarrow 0$.

3) Выделение области 1. Инициализация указателя стеков: $p_F \leftarrow 0$. Выбор начального пикселя роста – $p(0,0)$. Загрузка координат начального пикселя роста в стек: $y_F(0) \leftarrow 0, x_F(0) \leftarrow 0, p_F \leftarrow p_F + 1$. Приращение номера сегмента: $n_S \leftarrow n_S + 1 \Rightarrow n_S = 1$. Текущему элементу матрицы сегментации $s(0,0)$ присваивается значение n_S номера сегмента: $s(0,0) \leftarrow 1$. Диаграмма работы стека приведена на рис. 3.2, а, матрица сегментации – на рис. 3.2, б.

Начало цикла обработки стеков Y_F и X_F .

Цикл обработки смежных пикселей в окрестности пикселя $p(0,0)$:

$$(p_F \leftarrow p_F - 1, y \leftarrow y_F(0), x \leftarrow x_F(0), \vec{Y}_F, \vec{X}_F) \Rightarrow (y=0, x=0, p_F=0);$$

$$s(1,0)=0 \text{ и } |p(0,0) - p(1,0)| \leq 5 \Rightarrow s(1,0) \leftarrow s(0,0) \Rightarrow s(1,0)=1;$$

$$y_F(0) \leftarrow 1, x_F(0) \leftarrow 0, p_F \leftarrow p_F + 1 \Rightarrow p_F = 1.$$

Цикл обработки смежных пикселей в окрестности пикселя $p(1,0)$:

$$(p_F \leftarrow p_F - 1, y \leftarrow y_F(0), x \leftarrow x_F(0), \vec{Y}_F, \vec{X}_F) \Rightarrow (y=1, x=0, p_F=0);$$

$$s(1,1)=0 \text{ и } |p(1,0) - p(1,1)| \leq 5 \Rightarrow s(1,1) \leftarrow s(1,0) \Rightarrow s(1,1)=1;$$

$$y_F(0) \leftarrow 1, x_F(0) \leftarrow 1, p_F \leftarrow p_F + 1 \Rightarrow p_F = 1.$$

Цикл обработки смежных пикселей в окрестности пикселя $p(1,1)$:

$$(p_F \leftarrow p_F - 1, y \leftarrow y_F(0), x \leftarrow x_F(0), \vec{Y}_F, \vec{X}_F) \Rightarrow (y=1, x=1, p_F=0);$$

$$s(0,1)=0 \text{ и } |p(1,1)-p(0,1)| \leq 5 \Rightarrow s(0,1) \leftarrow s(1,1) \Rightarrow s(0,1)=1;$$

$$y_F(0) \leftarrow 0, x_F(0) \leftarrow 1, p_F \leftarrow p_F + 1 \Rightarrow p_F = 1.$$

Цикл обработки смежных пикселей в окрестности пикселя $p(0,1)$:

$$(p_F \leftarrow p_F - 1, y \leftarrow y_F(0), x \leftarrow x_F(0), \vec{Y}_F, \vec{X}_F) \Rightarrow (y=0, x=1, p_F=0);$$

$$s(0,2)=0 \text{ и } |p(0,1)-p(0,2)| \leq 5 \Rightarrow s(0,2) \leftarrow s(0,1) \Rightarrow s(0,2)=1;$$

$$y_F(0) \leftarrow 0, x_F(0) \leftarrow 2, p_F \leftarrow p_F + 1 \Rightarrow p_F = 1;$$

$$s(1,2)=0 \text{ и } |p(0,1)-p(1,2)| \leq 5 \Rightarrow s(1,2) \leftarrow s(0,1) \Rightarrow s(1,2)=1;$$

$$y_F(1) \leftarrow 1, x_F(1) \leftarrow 2, p_F \leftarrow p_F + 1 \Rightarrow p_F = 2.$$

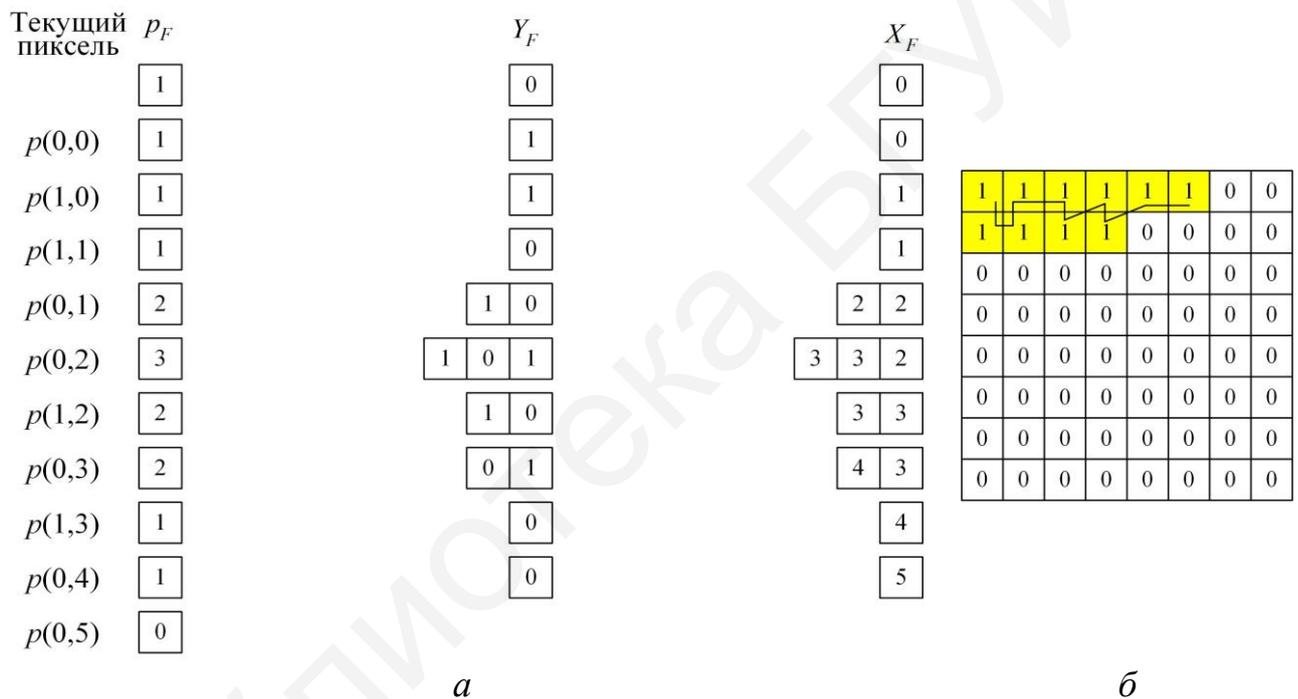


Рис. 3.2. Выделение области 1:

a – фрагмент диаграммы работы стеков; b – матрица сегментации

Цикл обработки смежных пикселей в окрестности пикселя $p(0,2)$:

$$(p_F \leftarrow p_F - 1, y \leftarrow y_F(0), x \leftarrow x_F(0), \vec{Y}_F, \vec{X}_F) \Rightarrow (y=0, x=2, p_F=1);$$

$$s(0,3)=0 \text{ и } |p(0,2)-p(0,3)| \leq 5 \Rightarrow s(0,3) \leftarrow s(0,2) \Rightarrow s(0,3)=1;$$

$$y_F(1) \leftarrow 0, x_F(1) \leftarrow 3, p_F \leftarrow p_F + 1 \Rightarrow p_F = 2;$$

$$s(1,3)=0 \text{ и } |p(0,2)-p(1,3)| \leq 5 \Rightarrow s(1,3) \leftarrow s(0,2) \Rightarrow s(1,3)=1;$$

$$y_F(2) \leftarrow 1, x_F(2) \leftarrow 3, p_F \leftarrow p_F + 1 \Rightarrow p_F = 3.$$

Цикл обработки смежных пикселей в окрестности пикселя $p(1,2)$:

$$(p_F \leftarrow p_F - 1, y \leftarrow y_F(0), x \leftarrow x_F(0), \vec{Y}_F, \vec{X}_F) \Rightarrow (y=1, x=2, p_F=2);$$

в окрестности пикселя $p(1,2)$ нет присоединяемых пикселей.

Цикл обработки смежных пикселей в окрестности пикселя $p(0,3)$:

$$(p_F \leftarrow p_F - 1, y \leftarrow y_F(0), x \leftarrow x_F(0), \vec{Y}_F, \vec{X}_F) \Rightarrow (y=0, x=3, p_F=1);$$

$$s(0,4)=0 \text{ и } |p(0,3)-p(0,4)| \leq 5 \Rightarrow s(0,4) \leftarrow s(0,3) \Rightarrow s(0,4)=1;$$

$$y_F(1) \leftarrow 0, x_F(1) \leftarrow 4, p_F \leftarrow p_F + 1 \Rightarrow p_F = 2.$$

Цикл обработки смежных пикселей в окрестности пикселя $p(1,3)$:

$$(p_F \leftarrow p_F - 1, y \leftarrow y_F(0), x \leftarrow x_F(0), \vec{Y}_F, \vec{X}_F) \Rightarrow (y=1, x=3, p_F=1);$$

в окрестности пикселя $p(1,3)$ нет присоединяемых пикселей.

Цикл обработки смежных пикселей в окрестности пикселя $p(0,4)$:

$$(p_F \leftarrow p_F - 1, y \leftarrow y_F(0), x \leftarrow x_F(0), \vec{Y}_F, \vec{X}_F) \Rightarrow (y=0, x=4, p_F=0);$$

$$s(0,5)=0 \text{ и } |p(0,4)-p(0,5)| \leq 5 \Rightarrow s(0,5) \leftarrow s(0,4) \Rightarrow s(0,5)=1;$$

$$y_F(0) \leftarrow 0, x_F(0) \leftarrow 5, p_F \leftarrow p_F + 1 \Rightarrow p_F = 1.$$

Цикл обработки смежных пикселей в окрестности пикселя $p(0,5)$:

$$(p_F \leftarrow p_F - 1, y \leftarrow y_F(0), x \leftarrow x_F(0), \vec{Y}_F, \vec{X}_F) \Rightarrow (y=0, x=5, p_F=0);$$

в окрестности пикселя $p(0,5)$ нет присоединяемых пикселей.

Стек пуст – область 1 выделена – окончание цикла обработки стеков Y_F и X_F .

4) Выделение области 2. Инициализация указателя стеков: $p_F \leftarrow 0$. Выбор начального пикселя роста – $p(0,6)$. Загрузка координат начального пикселя роста в стек: $y_F(0) \leftarrow 0, x_F(0) \leftarrow 6, p_F \leftarrow p_F + 1$. Приращение номера сегмента: $n_S \leftarrow n_S + 1 \Rightarrow n_S = 2$. Текущему элементу матрицы сегментации $s(0,6)$ присваивается значение n_S номера сегмента: $s(0,6) \leftarrow 2$. Диаграмма работы стека приведена на рис. 3.3, а, матрица сегментации – на рис. 3.3, б.

Начало цикла обработки стеков Y_F и X_F .

Цикл обработки смежных пикселей в окрестности пикселя $p(0,6)$:

$$(p_F \leftarrow p_F - 1, y \leftarrow y_F(0), x \leftarrow x_F(0), \vec{Y}_F, \vec{X}_F) \Rightarrow (y=0, x=6, p_F=0);$$

$$s(1,7)=0 \text{ и } |p(0,6)-p(1,7)| \leq 5 \Rightarrow s(1,7) \leftarrow s(0,6) \Rightarrow s(1,7)=2;$$

$$y_F(0) \leftarrow 1, x_F(0) \leftarrow 7, p_F \leftarrow p_F + 1 \Rightarrow p_F = 1;$$

$$s(1,6)=0 \text{ и } |p(0,6)-p(1,6)| \leq 5 \Rightarrow s(1,6) \leftarrow s(0,6) \Rightarrow s(1,6)=2;$$

$$y_F(1) \leftarrow 1, x_F(1) \leftarrow 6, p_F \leftarrow p_F + 1 \Rightarrow p_F = 2.$$

Цикл обработки смежных пикселей в окрестности пикселя $p(1,7)$:

$$(p_F \leftarrow p_F - 1, y \leftarrow y_F(0), x \leftarrow x_F(0), \vec{Y}_F, \vec{X}_F) \Rightarrow (y=1, x=7, p_F=1);$$

в окрестности пикселя $p(1,7)$ нет присоединяемых пикселей.

Цикл обработки смежных пикселей в окрестности пикселя $p(1,6)$:

$$(p_F \leftarrow p_F - 1, y \leftarrow y_F(0), x \leftarrow x_F(0), \vec{Y}_F, \vec{X}_F) \Rightarrow (y=1, x=6, p_F=0);$$

$$s(1,5)=0 \text{ и } |p(1,6)-p(1,5)| \leq 5 \Rightarrow s(1,5) \leftarrow s(1,6) \Rightarrow s(1,5)=2;$$

$$y_F(0) \leftarrow 1, x_F(0) \leftarrow 5, p_F \leftarrow p_F + 1 \Rightarrow p_F = 1.$$

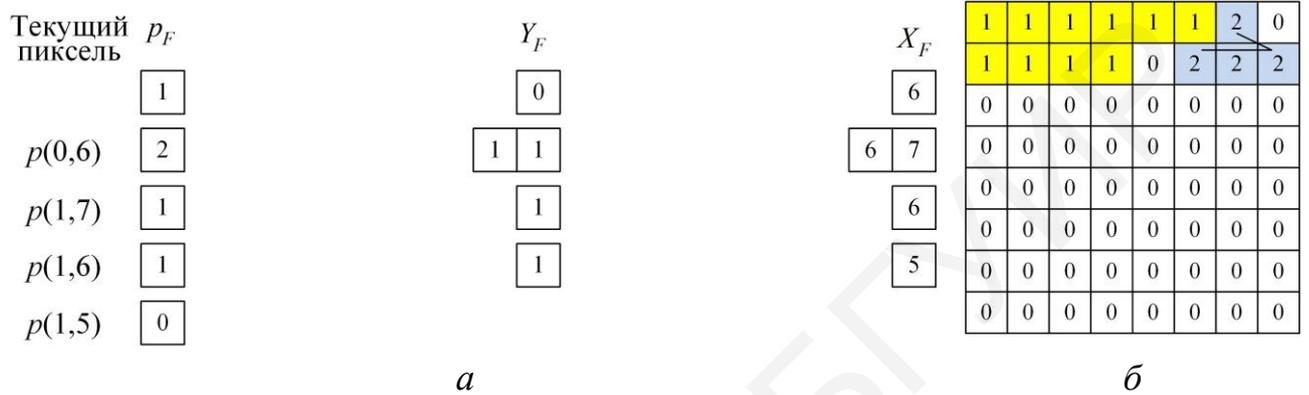


Рис. 3.3. Выделение области 2:

a – фрагмент диаграммы работы стеков; $б$ – матрица сегментации

Цикл обработки смежных пикселей в окрестности пикселя $p(1,5)$:

$$(p_F \leftarrow p_F - 1, y \leftarrow y_F(0), x \leftarrow x_F(0), \vec{Y}_F, \vec{X}_F) \Rightarrow (y=1, x=5, p_F=0);$$

в окрестности пикселя $p(1,5)$ нет присоединяемых пикселей.

Стек пуст – область 2 выделена – окончание цикла обработки стеков Y_F и X_F .

5) Выделение области 3. Инициализация указателя стеков: $p_F \leftarrow 0$. Выбор начального пикселя роста – $p(0,7)$. Загрузка координат начального пикселя роста в стек: $y_F(0) \leftarrow 0, x_F(0) \leftarrow 7, p_F \leftarrow p_F + 1$. Приращение номера сегмента: $n_S \leftarrow n_S + 1 \Rightarrow n_S = 3$. Текущему элементу матрицы сегментации $s(0,7)$ присваивается значение n_S номера сегмента: $s(0,7) \leftarrow 3$. Диаграмма работы стека приведена на рис. 3.4, a , матрица сегментации – на рис. 3.4, $б$.

Начало цикла обработки стеков Y_F и X_F .

Цикл обработки смежных пикселей в окрестности пикселя $p(0,7)$:

$$(p_F \leftarrow p_F - 1, y \leftarrow y_F(0), x \leftarrow x_F(0), \vec{Y}_F, \vec{X}_F) \Rightarrow (y=0, x=7, p_F=0);$$

в окрестности пикселя $p(0,7)$ нет присоединяемых пикселей.

Стек пуст – область 3 выделена – окончание цикла обработки стеков Y_F и X_F .

6) Выделение области 4. Инициализация указателя стеков: $p_F \leftarrow 0$. Выбор начального пикселя роста – $p(1,4)$. Загрузка координат начального пикселя роста в стек: $y_F(0) \leftarrow 1, x_F(0) \leftarrow 4, p_F \leftarrow p_F + 1$. Приращение номера сегмента:

$n_s \leftarrow n_s + 1 \Rightarrow n_s = 4$. Текущему элементу матрицы сегментации $s(1,4)$ присваивается значение n_s номера сегмента: $s(1,4) \leftarrow 4$. Диаграммы работы стека и матрицы сегментации на различных этапах роста области 4 приведены на рис. 3.5–3.7.

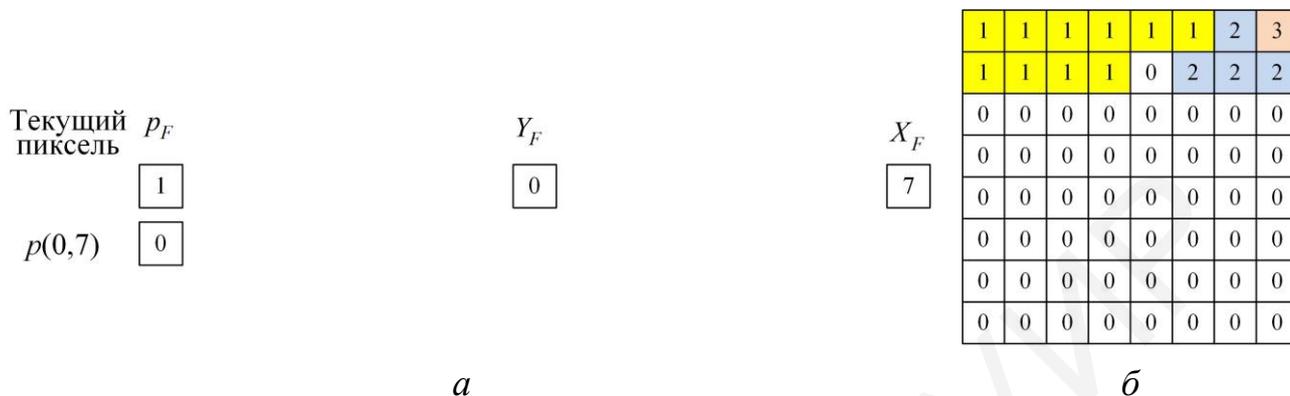


Рис. 3.4. Выделение области 3:
a – фрагмент диаграммы работы стеков; *б* – матрица сегментации

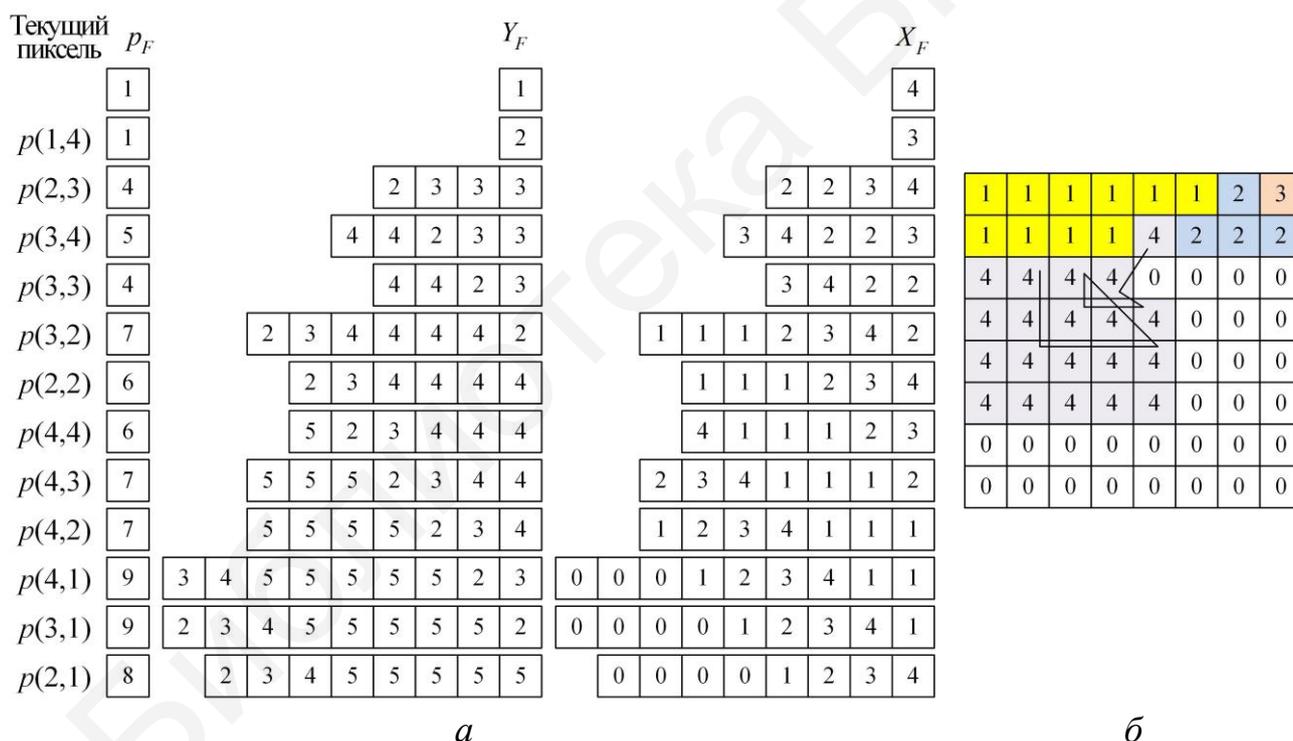


Рис. 3.5. Выделение области 4 (этап 1):
a – фрагмент диаграммы работы стеков; *б* – матрица сегментации

Начало цикла обработки стеков Y_F и X_F .

Цикл обработки смежных пикселей в окрестности пикселя $p(1,4)$:

$$(p_F \leftarrow p_F - 1, y \leftarrow y_F(0), x \leftarrow x_F(0), \vec{Y}_F, \vec{X}_F) \Rightarrow (y=1, x=4, p_F=0);$$

$$s(2,3)=0 \text{ и } |p(1,4) - p(2,3)| \leq 5 \Rightarrow s(2,3) \leftarrow s(1,4) \Rightarrow s(2,3)=4;$$

$$y_F(0) \leftarrow 2, x_F(0) \leftarrow 3, p_F \leftarrow p_F + 1 \Rightarrow p_F = 1.$$

Цикл обработки смежных пикселей в окрестности пикселя $p(2,3)$:

$$(p_F \leftarrow p_F - 1, y \leftarrow y_F(0), x \leftarrow x_F(0), \vec{Y}_F, \vec{X}_F) \Rightarrow (y=2, x=3, p_F=0);$$

$$s(3,4)=0 \text{ и } |p(2,3)-p(3,4)| \leq 5 \Rightarrow s(3,4) \leftarrow s(2,3) \Rightarrow s(3,4)=4;$$

$$y_F(0) \leftarrow 3, x_F(0) \leftarrow 4, p_F \leftarrow p_F + 1 \Rightarrow p_F = 1;$$

$$s(3,3)=0 \text{ и } |p(2,3)-p(3,3)| \leq 5 \Rightarrow s(3,3) \leftarrow s(2,3) \Rightarrow s(3,3)=4;$$

$$y_F(1) \leftarrow 3, x_F(1) \leftarrow 3, p_F \leftarrow p_F + 1 \Rightarrow p_F = 2;$$

$$s(3,2)=0 \text{ и } |p(2,3)-p(3,2)| \leq 5 \Rightarrow s(3,2) \leftarrow s(2,3) \Rightarrow s(3,2)=4;$$

$$y_F(2) \leftarrow 3, x_F(2) \leftarrow 2, p_F \leftarrow p_F + 1 \Rightarrow p_F = 3;$$

$$s(2,2)=0 \text{ и } |p(2,3)-p(2,2)| \leq 5 \Rightarrow s(2,2) \leftarrow s(2,3) \Rightarrow s(2,2)=4;$$

$$y_F(3) \leftarrow 2, x_F(3) \leftarrow 2, p_F \leftarrow p_F + 1 \Rightarrow p_F = 4.$$

Цикл обработки смежных пикселей в окрестности пикселя $p(3,4)$:

$$(p_F \leftarrow p_F - 1, y \leftarrow y_F(0), x \leftarrow x_F(0), \vec{Y}_F, \vec{X}_F) \Rightarrow (y=3, x=4, p_F=3);$$

$$s(4,4)=0 \text{ и } |p(3,4)-p(4,4)| \leq 5 \Rightarrow s(4,4) \leftarrow s(3,4) \Rightarrow s(4,4)=4;$$

$$y_F(3) \leftarrow 4, x_F(3) \leftarrow 4, p_F \leftarrow p_F + 1 \Rightarrow p_F = 4;$$

$$s(4,3)=0 \text{ и } |p(3,4)-p(4,3)| \leq 5 \Rightarrow s(4,3) \leftarrow s(3,4) \Rightarrow s(4,3)=4;$$

$$y_F(4) \leftarrow 4, x_F(4) \leftarrow 3, p_F \leftarrow p_F + 1 \Rightarrow p_F = 5.$$

Цикл обработки смежных пикселей в окрестности пикселя $p(3,3)$:

$$(p_F \leftarrow p_F - 1, y \leftarrow y_F(0), x \leftarrow x_F(0), \vec{Y}_F, \vec{X}_F) \Rightarrow (y=3, x=3, p_F=4);$$

в окрестности пикселя $p(3,3)$ нет присоединяемых пикселей.

Цикл обработки смежных пикселей в окрестности пикселя $p(3,2)$:

$$(p_F \leftarrow p_F - 1, y \leftarrow y_F(0), x \leftarrow x_F(0), \vec{Y}_F, \vec{X}_F) \Rightarrow (y=3, x=2, p_F=3);$$

$$s(4,2)=0 \text{ и } |p(3,2)-p(4,2)| \leq 5 \Rightarrow s(4,2) \leftarrow s(3,2) \Rightarrow s(4,2)=4;$$

$$y_F(3) \leftarrow 4, x_F(3) \leftarrow 2, p_F \leftarrow p_F + 1 \Rightarrow p_F = 4;$$

$$s(4,1)=0 \text{ и } |p(3,2)-p(4,1)| \leq 5 \Rightarrow s(4,1) \leftarrow s(3,2) \Rightarrow s(4,1)=4;$$

$$y_F(4) \leftarrow 4, x_F(4) \leftarrow 1, p_F \leftarrow p_F + 1 \Rightarrow p_F = 5;$$

$$s(3,1)=0 \text{ и } |p(3,2)-p(3,1)| \leq 5 \Rightarrow s(3,1) \leftarrow s(3,2) \Rightarrow s(3,1)=4;$$

$$y_F(5) \leftarrow 3, x_F(5) \leftarrow 1, p_F \leftarrow p_F + 1 \Rightarrow p_F = 6;$$

$$s(2,1)=0 \text{ и } |p(3,2)-p(2,1)| \leq 5 \Rightarrow s(2,1) \leftarrow s(3,2) \Rightarrow s(2,1)=4;$$

$$y_F(6) \leftarrow 2, x_F(6) \leftarrow 1, p_F \leftarrow p_F + 1 \Rightarrow p_F = 7.$$

Цикл обработки смежных пикселей в окрестности пикселя $p(2,2)$:

$(p_F \leftarrow p_F - 1, y \leftarrow y_F(0), x \leftarrow x_F(0), \vec{Y}_F, \vec{X}_F) \Rightarrow (y=2, x=2, p_F=6)$;
в окрестности пикселя $p(2,2)$ нет присоединяемых пикселей.

Цикл обработки смежных пикселей в окрестности пикселя $p(4,4)$:

$(p_F \leftarrow p_F - 1, y \leftarrow y_F(0), x \leftarrow x_F(0), \vec{Y}_F, \vec{X}_F) \Rightarrow (y=4, x=4, p_F=5)$;
 $s(5,4)=0$ и $|p(4,4)-p(5,4)| \leq 5 \Rightarrow s(5,4) \leftarrow s(4,4) \Rightarrow s(5,4)=4$;
 $y_F(5) \leftarrow 5, x_F(5) \leftarrow 4, p_F \leftarrow p_F + 1 \Rightarrow p_F=6$.

Цикл обработки смежных пикселей в окрестности пикселя $p(4,3)$:

$(p_F \leftarrow p_F - 1, y \leftarrow y_F(0), x \leftarrow x_F(0), \vec{Y}_F, \vec{X}_F) \Rightarrow (y=4, x=3, p_F=5)$;
 $s(5,3)=0$ и $|p(4,3)-p(5,3)| \leq 5 \Rightarrow s(5,3) \leftarrow s(4,3) \Rightarrow s(5,3)=4$;
 $y_F(5) \leftarrow 5, x_F(5) \leftarrow 3, p_F \leftarrow p_F + 1 \Rightarrow p_F=6$;
 $s(5,2)=0$ и $|p(4,3)-p(5,2)| \leq 5 \Rightarrow s(5,2) \leftarrow s(4,3) \Rightarrow s(5,2)=4$;
 $y_F(6) \leftarrow 5, x_F(6) \leftarrow 2, p_F \leftarrow p_F + 1 \Rightarrow p_F=7$.

Цикл обработки смежных пикселей в окрестности пикселя $p(4,2)$:

$(p_F \leftarrow p_F - 1, y \leftarrow y_F(0), x \leftarrow x_F(0), \vec{Y}_F, \vec{X}_F) \Rightarrow (y=4, x=2, p_F=6)$;
 $s(5,1)=0$ и $|p(4,2)-p(5,1)| \leq 5 \Rightarrow s(5,1) \leftarrow s(4,2) \Rightarrow s(5,1)=4$;
 $y_F(6) \leftarrow 5, x_F(6) \leftarrow 1, p_F \leftarrow p_F + 1 \Rightarrow p_F=7$.

Цикл обработки смежных пикселей в окрестности пикселя $p(4,1)$:

$(p_F \leftarrow p_F - 1, y \leftarrow y_F(0), x \leftarrow x_F(0), \vec{Y}_F, \vec{X}_F) \Rightarrow (y=4, x=1, p_F=6)$;
 $s(5,0)=0$ и $|p(4,1)-p(5,0)| \leq 5 \Rightarrow s(5,0) \leftarrow s(4,1) \Rightarrow s(5,0)=4$;
 $y_F(6) \leftarrow 5, x_F(6) \leftarrow 0, p_F \leftarrow p_F + 1 \Rightarrow p_F=7$;
 $s(4,0)=0$ и $|p(4,1)-p(4,0)| \leq 5 \Rightarrow s(4,0) \leftarrow s(4,1) \Rightarrow s(4,0)=4$;
 $y_F(7) \leftarrow 4, x_F(7) \leftarrow 0, p_F \leftarrow p_F + 1 \Rightarrow p_F=8$;
 $s(3,0)=0$ и $|p(4,1)-p(3,0)| \leq 5 \Rightarrow s(3,0) \leftarrow s(4,1) \Rightarrow s(3,0)=4$;
 $y_F(8) \leftarrow 3, x_F(8) \leftarrow 0, p_F \leftarrow p_F + 1 \Rightarrow p_F=9$.

Цикл обработки смежных пикселей в окрестности пикселя $p(3,1)$:

$(p_F \leftarrow p_F - 1, y \leftarrow y_F(0), x \leftarrow x_F(0), \vec{Y}_F, \vec{X}_F) \Rightarrow (y=3, x=1, p_F=8)$;
 $s(2,0)=0$ и $|p(3,1)-p(2,0)| \leq 5 \Rightarrow s(2,0) \leftarrow s(3,1) \Rightarrow s(2,0)=4$;
 $y_F(8) \leftarrow 2, x_F(8) \leftarrow 0, p_F \leftarrow p_F + 1 \Rightarrow p_F=9$.

Цикл обработки смежных пикселей в окрестности пикселя $p(2,1)$:

$(p_F \leftarrow p_F - 1, y \leftarrow y_F(0), x \leftarrow x_F(0), \vec{Y}_F, \vec{X}_F) \Rightarrow (y=2, x=1, p_F=8)$;

в окрестности пикселя $p(2,1)$ нет присоединяемых пикселей.

Цикл обработки смежных пикселей в окрестности пикселя $p(5,4)$:

$(p_F \leftarrow p_F - 1, y \leftarrow y_F(0), x \leftarrow x_F(0), \vec{Y}_F, \vec{X}_F) \Rightarrow (y=5, x=4, p_F=7)$;

$s(6,4)=0$ и $|p(5,4)-p(6,4)| \leq 5 \Rightarrow s(6,4) \leftarrow s(5,4) \Rightarrow s(6,4)=4$;

$y_F(7) \leftarrow 6, x_F(7) \leftarrow 4, p_F \leftarrow p_F + 1 \Rightarrow p_F=8$;

$s(6,3)=0$ и $|p(5,4)-p(6,3)| \leq 5 \Rightarrow s(6,3) \leftarrow s(5,4) \Rightarrow s(6,3)=4$;

$y_F(8) \leftarrow 6, x_F(8) \leftarrow 3, p_F \leftarrow p_F + 1 \Rightarrow p_F=9$.

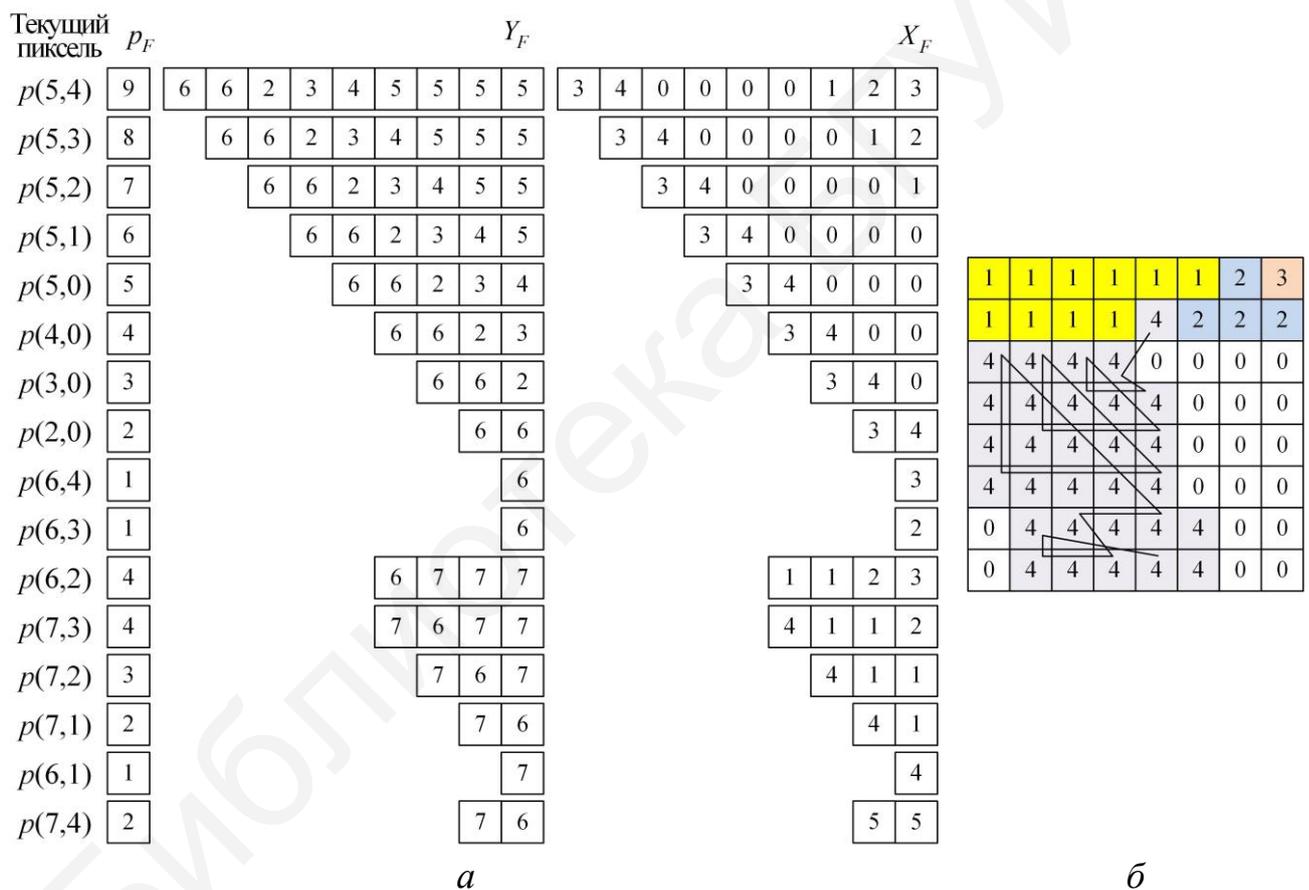


Рис. 3.6. Выделение области 4 (этап 2):

a – фрагмент диаграммы работы стеков; b – матрица сегментации

Цикл обработки смежных пикселей в окрестности пикселя $p(5,3)$:

$(p_F \leftarrow p_F - 1, y \leftarrow y_F(0), x \leftarrow x_F(0), \vec{Y}_F, \vec{X}_F) \Rightarrow (y=5, x=3, p_F=8)$;

в окрестности пикселя $p(5,3)$ нет присоединяемых пикселей.

Цикл обработки смежных пикселей в окрестности пикселя $p(5,2)$:

$(p_F \leftarrow p_F - 1, y \leftarrow y_F(0), x \leftarrow x_F(0), \vec{Y}_F, \vec{X}_F) \Rightarrow (y=5, x=2, p_F=7)$;

в окрестности пикселя $p(5,2)$ нет присоединяемых пикселей.

Цикл обработки смежных пикселей в окрестности пикселя $p(5,1)$:

$$(p_F \leftarrow p_F - 1, y \leftarrow y_F(0), x \leftarrow x_F(0), \vec{Y}_F, \vec{X}_F) \Rightarrow (y=5, x=1, p_F=6);$$

в окрестности пикселя $p(5,1)$ нет присоединяемых пикселей.

Цикл обработки смежных пикселей в окрестности пикселя $p(5,0)$:

$$(p_F \leftarrow p_F - 1, y \leftarrow y_F(0), x \leftarrow x_F(0), \vec{Y}_F, \vec{X}_F) \Rightarrow (y=5, x=0, p_F=5);$$

в окрестности пикселя $p(5,0)$ нет присоединяемых пикселей.

Цикл обработки смежных пикселей в окрестности пикселя $p(4,0)$:

$$(p_F \leftarrow p_F - 1, y \leftarrow y_F(0), x \leftarrow x_F(0), \vec{Y}_F, \vec{X}_F) \Rightarrow (y=4, x=0, p_F=4);$$

в окрестности пикселя $p(4,0)$ нет присоединяемых пикселей.

Цикл обработки смежных пикселей в окрестности пикселя $p(3,0)$:

$$(p_F \leftarrow p_F - 1, y \leftarrow y_F(0), x \leftarrow x_F(0), \vec{Y}_F, \vec{X}_F) \Rightarrow (y=3, x=0, p_F=3);$$

в окрестности пикселя $p(3,0)$ нет присоединяемых пикселей.

Цикл обработки смежных пикселей в окрестности пикселя $p(2,0)$:

$$(p_F \leftarrow p_F - 1, y \leftarrow y_F(0), x \leftarrow x_F(0), \vec{Y}_F, \vec{X}_F) \Rightarrow (y=2, x=0, p_F=2);$$

в окрестности пикселя $p(2,0)$ нет присоединяемых пикселей.

Цикл обработки смежных пикселей в окрестности пикселя $p(6,4)$:

$$(p_F \leftarrow p_F - 1, y \leftarrow y_F(0), x \leftarrow x_F(0), \vec{Y}_F, \vec{X}_F) \Rightarrow (y=6, x=4, p_F=1);$$

в окрестности пикселя $p(6,4)$ нет присоединяемых пикселей.

Цикл обработки смежных пикселей в окрестности пикселя $p(6,3)$:

$$(p_F \leftarrow p_F - 1, y \leftarrow y_F(0), x \leftarrow x_F(0), \vec{Y}_F, \vec{X}_F) \Rightarrow (y=6, x=3, p_F=0);$$

$$s(6,2)=0 \text{ и } |p(6,3)-p(6,2)| \leq 5 \Rightarrow s(6,2) \leftarrow s(6,3) \Rightarrow s(6,2)=4;$$

$$y_F(0) \leftarrow 6, x_F(0) \leftarrow 2, p_F \leftarrow p_F + 1 \Rightarrow p_F=1.$$

Цикл обработки смежных пикселей в окрестности пикселя $p(6,2)$:

$$(p_F \leftarrow p_F - 1, y \leftarrow y_F(0), x \leftarrow x_F(0), \vec{Y}_F, \vec{X}_F) \Rightarrow (y=6, x=2, p_F=0);$$

$$s(7,3)=0 \text{ и } |p(6,2)-p(7,3)| \leq 5 \Rightarrow s(7,3) \leftarrow s(6,2) \Rightarrow s(7,3)=4;$$

$$y_F(0) \leftarrow 7, x_F(0) \leftarrow 3, p_F \leftarrow p_F + 1 \Rightarrow p_F=1;$$

$$s(7,2)=0 \text{ и } |p(6,2)-p(7,2)| \leq 5 \Rightarrow s(7,2) \leftarrow s(6,2) \Rightarrow s(7,2)=4;$$

$$y_F(1) \leftarrow 7, x_F(1) \leftarrow 2, p_F \leftarrow p_F + 1 \Rightarrow p_F=2;$$

$$s(7,1)=0 \text{ и } |p(6,2)-p(7,1)| \leq 5 \Rightarrow s(7,1) \leftarrow s(6,2) \Rightarrow s(7,1)=4;$$

$$y_F(2) \leftarrow 7, x_F(2) \leftarrow 1, p_F \leftarrow p_F + 1 \Rightarrow p_F=3;$$

$$s(6,1)=0 \text{ и } |p(6,2)-p(6,1)| \leq 5 \Rightarrow s(6,1) \leftarrow s(6,2) \Rightarrow s(6,1)=4;$$

$$y_F(3) \leftarrow 6, x_F(3) \leftarrow 1, p_F \leftarrow p_F + 1 \Rightarrow p_F = 4.$$

Цикл обработки смежных пикселей в окрестности пикселя $p(7,3)$:

$$(p_F \leftarrow p_F - 1, y \leftarrow y_F(0), x \leftarrow x_F(0), \vec{Y}_F, \vec{X}_F) \Rightarrow (y=7, x=3, p_F=3);$$

$$s(7,4)=0 \text{ и } |p(7,3)-p(7,4)| \leq 5 \Rightarrow s(7,4) \leftarrow s(7,3) \Rightarrow s(7,4)=4;$$

$$y_F(3) \leftarrow 7, x_F(3) \leftarrow 4, p_F \leftarrow p_F + 1 \Rightarrow p_F = 4.$$

Цикл обработки смежных пикселей в окрестности пикселя $p(7,2)$:

$$(p_F \leftarrow p_F - 1, y \leftarrow y_F(0), x \leftarrow x_F(0), \vec{Y}_F, \vec{X}_F) \Rightarrow (y=7, x=2, p_F=3);$$

в окрестности пикселя $p(7,2)$ нет присоединяемых пикселей.

Цикл обработки смежных пикселей в окрестности пикселя $p(7,1)$:

$$(p_F \leftarrow p_F - 1, y \leftarrow y_F(0), x \leftarrow x_F(0), \vec{Y}_F, \vec{X}_F) \Rightarrow (y=7, x=1, p_F=2);$$

в окрестности пикселя $p(7,1)$ нет присоединяемых пикселей.

Цикл обработки смежных пикселей в окрестности пикселя $p(6,1)$:

$$(p_F \leftarrow p_F - 1, y \leftarrow y_F(0), x \leftarrow x_F(0), \vec{Y}_F, \vec{X}_F) \Rightarrow (y=6, x=1, p_F=1);$$

в окрестности пикселя $p(6,1)$ нет присоединяемых пикселей.

Цикл обработки смежных пикселей в окрестности пикселя $p(7,4)$:

$$(p_F \leftarrow p_F - 1, y \leftarrow y_F(0), x \leftarrow x_F(0), \vec{Y}_F, \vec{X}_F) \Rightarrow (y=7, x=4, p_F=0);$$

$$s(6,5)=0 \text{ и } |p(7,4)-p(6,5)| \leq 5 \Rightarrow s(6,5) \leftarrow s(7,4) \Rightarrow s(6,5)=4;$$

$$y_F(0) \leftarrow 6, x_F(0) \leftarrow 5, p_F \leftarrow p_F + 1 \Rightarrow p_F = 1;$$

$$s(7,5)=0 \text{ и } |p(7,4)-p(7,5)| \leq 5 \Rightarrow s(7,5) \leftarrow s(7,4) \Rightarrow s(7,5)=4;$$

$$y_F(1) \leftarrow 6, x_F(1) \leftarrow 5, p_F \leftarrow p_F + 1 \Rightarrow p_F = 2.$$

Цикл обработки смежных пикселей в окрестности пикселя $p(6,5)$:

$$(p_F \leftarrow p_F - 1, y \leftarrow y_F(0), x \leftarrow x_F(0), \vec{Y}_F, \vec{X}_F) \Rightarrow (y=6, x=5, p_F=1);$$

$$s(5,5)=0 \text{ и } |p(6,5)-p(5,5)| \leq 5 \Rightarrow s(5,5) \leftarrow s(6,5) \Rightarrow s(5,5)=4;$$

$$y_F(1) \leftarrow 5, x_F(1) \leftarrow 5, p_F \leftarrow p_F + 1 \Rightarrow p_F = 2.$$

Цикл обработки смежных пикселей в окрестности пикселя $p(7,5)$:

$$(p_F \leftarrow p_F - 1, y \leftarrow y_F(0), x \leftarrow x_F(0), \vec{Y}_F, \vec{X}_F) \Rightarrow (y=7, x=5, p_F=1);$$

в окрестности пикселя $p(7,5)$ нет присоединяемых пикселей.

Цикл обработки смежных пикселей в окрестности пикселя $p(5,5)$:

$$(p_F \leftarrow p_F - 1, y \leftarrow y_F(0), x \leftarrow x_F(0), \vec{Y}_F, \vec{X}_F) \Rightarrow (y=5, x=5, p_F=0);$$

$$s(4,5)=0 \text{ и } |p(5,5)-p(4,5)| \leq 5 \Rightarrow s(4,5) \leftarrow s(5,5) \Rightarrow s(4,5)=4;$$

$$y_F(0) \leftarrow 4, x_F(0) \leftarrow 5, p_F \leftarrow p_F + 1 \Rightarrow p_F = 1.$$

Цикл обработки смежных пикселей в окрестности пикселя $p(4,5)$:

$$(p_F \leftarrow p_F - 1, y \leftarrow y_F(0), x \leftarrow x_F(0), \vec{Y}_F, \vec{X}_F) \Rightarrow (y=4, x=5, p_F=0);$$

$$s(3,6)=0 \text{ и } |p(4,5)-p(3,6)| \leq 5 \Rightarrow s(3,6) \leftarrow s(4,5) \Rightarrow s(3,6)=4;$$

$$y_F(0) \leftarrow 3, x_F(0) \leftarrow 6, p_F \leftarrow p_F + 1 \Rightarrow p_F = 1.$$

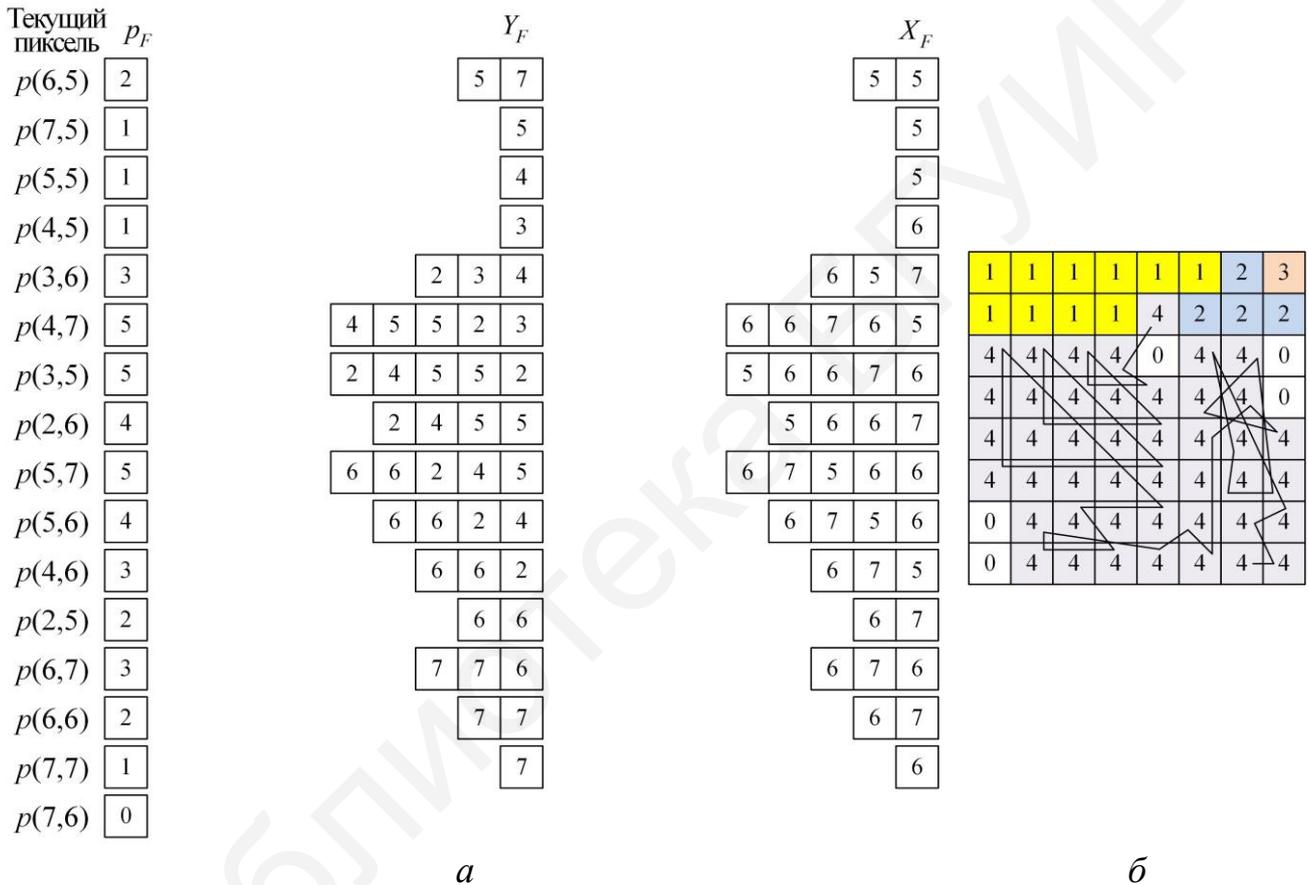


Рис. 3.7. Выделение области 4 (этап 3):

a – фрагмент диаграммы работы стеков; b – матрица сегментации

Цикл обработки смежных пикселей в окрестности пикселя $p(3,6)$:

$$(p_F \leftarrow p_F - 1, y \leftarrow y_F(0), x \leftarrow x_F(0), \vec{Y}_F, \vec{X}_F) \Rightarrow (y=3, x=6, p_F=0);$$

$$s(4,7)=0 \text{ и } |p(3,6)-p(4,7)| \leq 5 \Rightarrow s(4,7) \leftarrow s(3,6) \Rightarrow s(4,7)=4;$$

$$y_F(0) \leftarrow 4, x_F(0) \leftarrow 7, p_F \leftarrow p_F + 1 \Rightarrow p_F = 1;$$

$$s(3,5)=0 \text{ и } |p(3,6)-p(3,5)| \leq 5 \Rightarrow s(3,5) \leftarrow s(3,6) \Rightarrow s(3,5)=4;$$

$$y_F(1) \leftarrow 3, x_F(1) \leftarrow 5, p_F \leftarrow p_F + 1 \Rightarrow p_F = 2;$$

$$s(2,6)=0 \text{ и } |p(3,6)-p(2,6)| \leq 5 \Rightarrow s(2,6) \leftarrow s(3,6) \Rightarrow s(2,6)=4;$$

$$y_F(2) \leftarrow 2, x_F(2) \leftarrow 6, p_F \leftarrow p_F + 1 \Rightarrow p_F = 3.$$

Цикл обработки смежных пикселей в окрестности пикселя $p(4,7)$:

$$(p_F \leftarrow p_F - 1, y \leftarrow y_F(0), x \leftarrow x_F(0), \vec{Y}_F, \vec{X}_F) \Rightarrow (y=4, x=7, p_F=2);$$

$$s(5,7)=0 \text{ и } |p(4,7)-p(5,7)| \leq 5 \Rightarrow s(5,7) \leftarrow s(4,7) \Rightarrow s(5,7)=4;$$

$$y_F(2) \leftarrow 5, x_F(2) \leftarrow 7, p_F \leftarrow p_F + 1 \Rightarrow p_F = 3;$$

$$s(5,6)=0 \text{ и } |p(4,7)-p(5,6)| \leq 5 \Rightarrow s(5,6) \leftarrow s(4,7) \Rightarrow s(5,6)=4;$$

$$y_F(3) \leftarrow 5, x_F(3) \leftarrow 6, p_F \leftarrow p_F + 1 \Rightarrow p_F = 4;$$

$$s(4,6)=0 \text{ и } |p(4,7)-p(4,6)| \leq 5 \Rightarrow s(4,6) \leftarrow s(4,7) \Rightarrow s(4,6)=4;$$

$$y_F(4) \leftarrow 4, x_F(4) \leftarrow 6, p_F \leftarrow p_F + 1 \Rightarrow p_F = 5.$$

Цикл обработки смежных пикселей в окрестности пикселя $p(3,5)$:

$$(p_F \leftarrow p_F - 1, y \leftarrow y_F(0), x \leftarrow x_F(0), \vec{Y}_F, \vec{X}_F) \Rightarrow (y=3, x=5, p_F=4);$$

$$s(2,5)=0 \text{ и } |p(3,5)-p(2,5)| \leq 5 \Rightarrow s(2,5) \leftarrow s(3,5) \Rightarrow s(2,5)=4;$$

$$y_F(4) \leftarrow 2, x_F(4) \leftarrow 5, p_F \leftarrow p_F + 1 \Rightarrow p_F = 5.$$

Цикл обработки смежных пикселей в окрестности пикселя $p(2,6)$:

$$(p_F \leftarrow p_F - 1, y \leftarrow y_F(0), x \leftarrow x_F(0), \vec{Y}_F, \vec{X}_F) \Rightarrow (y=2, x=6, p_F=4);$$

в окрестности пикселя $p(2,6)$ нет присоединяемых пикселей.

Цикл обработки смежных пикселей в окрестности пикселя $p(5,7)$:

$$(p_F \leftarrow p_F - 1, y \leftarrow y_F(0), x \leftarrow x_F(0), \vec{Y}_F, \vec{X}_F) \Rightarrow (y=5, x=7, p_F=3);$$

$$s(6,7)=0 \text{ и } |p(5,7)-p(6,7)| \leq 5 \Rightarrow s(6,7) \leftarrow s(5,7) \Rightarrow s(6,7)=4;$$

$$y_F(3) \leftarrow 6, x_F(3) \leftarrow 7, p_F \leftarrow p_F + 1 \Rightarrow p_F = 4;$$

$$s(6,6)=0 \text{ и } |p(5,7)-p(6,6)| \leq 5 \Rightarrow s(6,6) \leftarrow s(5,7) \Rightarrow s(6,6)=4;$$

$$y_F(4) \leftarrow 6, x_F(4) \leftarrow 6, p_F \leftarrow p_F + 1 \Rightarrow p_F = 5.$$

Цикл обработки смежных пикселей в окрестности пикселя $p(5,6)$:

$$(p_F \leftarrow p_F - 1, y \leftarrow y_F(0), x \leftarrow x_F(0), \vec{Y}_F, \vec{X}_F) \Rightarrow (y=5, x=6, p_F=4);$$

в окрестности пикселя $p(5,6)$ нет присоединяемых пикселей.

Цикл обработки смежных пикселей в окрестности пикселя $p(4,6)$:

$$(p_F \leftarrow p_F - 1, y \leftarrow y_F(0), x \leftarrow x_F(0), \vec{Y}_F, \vec{X}_F) \Rightarrow (y=4, x=6, p_F=3);$$

в окрестности пикселя $p(4,6)$ нет присоединяемых пикселей.

Цикл обработки смежных пикселей в окрестности пикселя $p(2,5)$:

$$(p_F \leftarrow p_F - 1, y \leftarrow y_F(0), x \leftarrow x_F(0), \vec{Y}_F, \vec{X}_F) \Rightarrow (y=2, x=5, p_F=2);$$

в окрестности пикселя $p(2,5)$ нет присоединяемых пикселей.

Цикл обработки смежных пикселей в окрестности пикселя $p(6,7)$:

$$(p_F \leftarrow p_F - 1, y \leftarrow y_F(0), x \leftarrow x_F(0), \vec{Y}_F, \vec{X}_F) \Rightarrow (y=6, x=7, p_F=1);$$

$$s(7,7)=0 \text{ и } |p(6,7)-p(7,7)| \leq 5 \Rightarrow s(7,7) \leftarrow s(6,7) \Rightarrow s(7,7)=4;$$

$$y_F(1) \leftarrow 7, x_F(1) \leftarrow 7, p_F \leftarrow p_F + 1 \Rightarrow p_F=2;$$

$$s(7,6)=0 \text{ и } |p(6,7)-p(7,6)| \leq 5 \Rightarrow s(7,6) \leftarrow s(6,7) \Rightarrow s(7,6)=4;$$

$$y_F(2) \leftarrow 7, x_F(2) \leftarrow 6, p_F \leftarrow p_F + 1 \Rightarrow p_F=3.$$

Цикл обработки смежных пикселей в окрестности пикселя $p(6,6)$:

$$(p_F \leftarrow p_F - 1, y \leftarrow y_F(0), x \leftarrow x_F(0), \vec{Y}_F, \vec{X}_F) \Rightarrow (y=6, x=6, p_F=2);$$

в окрестности пикселя $p(6,6)$ нет присоединяемых пикселей.

Цикл обработки смежных пикселей в окрестности пикселя $p(7,7)$:

$$(p_F \leftarrow p_F - 1, y \leftarrow y_F(0), x \leftarrow x_F(0), \vec{Y}_F, \vec{X}_F) \Rightarrow (y=7, x=7, p_F=1);$$

в окрестности пикселя $p(7,7)$ нет присоединяемых пикселей.

Цикл обработки смежных пикселей в окрестности пикселя $p(7,6)$:

$$(p_F \leftarrow p_F - 1, y \leftarrow y_F(0), x \leftarrow x_F(0), \vec{Y}_F, \vec{X}_F) \Rightarrow (y=7, x=6, p_F=0);$$

в окрестности пикселя $p(7,6)$ нет присоединяемых пикселей.

Стек пуст – область 4 выделена – окончание цикла обработки стеков Y_F и X_F .

7) Выделение области 5. Инициализация указателя стеков: $p_F \leftarrow 0$. Выбор начального пикселя роста – $p(2,4)$. Загрузка координат начального пикселя роста в стек: $y_F(0) \leftarrow 2, x_F(0) \leftarrow 4, p_F \leftarrow p_F + 1$. Приращение номера сегмента: $n_S \leftarrow n_S + 1 \Rightarrow n_S = 5$. Текущему элементу матрицы сегментации $s(2,4)$ присваивается значение n_S номера сегмента: $s(2,4) \leftarrow 5$. Диаграмма работы стека приведена на рис. 3.8, а, матрица сегментации – на рис. 3.8, б.

Начало цикла обработки стеков Y_F и X_F .

Цикл обработки смежных пикселей в окрестности пикселя $p(2,4)$:

$$(p_F \leftarrow p_F - 1, y \leftarrow y_F(0), x \leftarrow x_F(0), \vec{Y}_F, \vec{X}_F) \Rightarrow (y=2, x=4, p_F=0);$$

в окрестности пикселя $p(2,4)$ нет присоединяемых пикселей.

Стек пуст – область 5 выделена – окончание цикла обработки стеков Y_F и X_F .

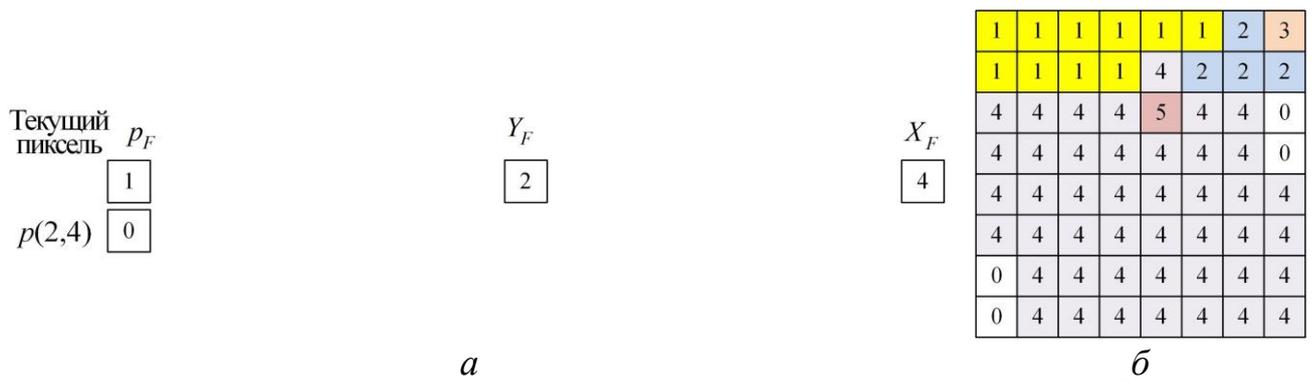


Рис. 3.8. Выделение области 5:

a – фрагмент диаграммы работы стеков; *б* – матрица сегментации

8) Выделение области 6. Инициализация указателя стеков: $p_F \leftarrow 0$. Выбор начального пикселя роста – $p(2,7)$. Загрузка координат начального пикселя роста в стек: $y_F(0) \leftarrow 2$, $x_F(0) \leftarrow 7$, $p_F \leftarrow p_F + 1$. Приращение номера сегмента: $n_S \leftarrow n_S + 1 \Rightarrow n_S = 6$. Текущему элементу матрицы сегментации $s(2,7)$ присваивается значение n_S номера сегмента: $s(2,7) \leftarrow 6$. Диаграмма работы стека приведена на рис. 3.9, *a*, матрица сегментации – на рис. 3.9, *б*.

Начало цикла обработки стеков Y_F и X_F .

Цикл обработки смежных пикселей в окрестности пикселя $p(2,7)$:

$$(p_F \leftarrow p_F - 1, y \leftarrow y_F(0), x \leftarrow x_F(0), \vec{Y}_F, \vec{X}_F) \Rightarrow (y = 2, x = 7, p_F = 0);$$

$$s(3,7) = 0 \text{ и } |p(2,7) - p(3,7)| \leq 5 \Rightarrow s(3,7) \leftarrow s(2,7) \Rightarrow s(3,7) = 6;$$

$$y_F(0) \leftarrow 3, x_F(0) \leftarrow 7, p_F \leftarrow p_F + 1 \Rightarrow p_F = 1.$$

Цикл обработки смежных пикселей в окрестности пикселя $p(3,7)$:

$$(p_F \leftarrow p_F - 1, y \leftarrow y_F(0), x \leftarrow x_F(0), \vec{Y}_F, \vec{X}_F) \Rightarrow (y = 3, x = 7, p_F = 0);$$

в окрестности пикселя $p(3,7)$ нет присоединяемых пикселей.

Стек пуст – область 6 выделена – окончание цикла обработки стеков Y_F и X_F .

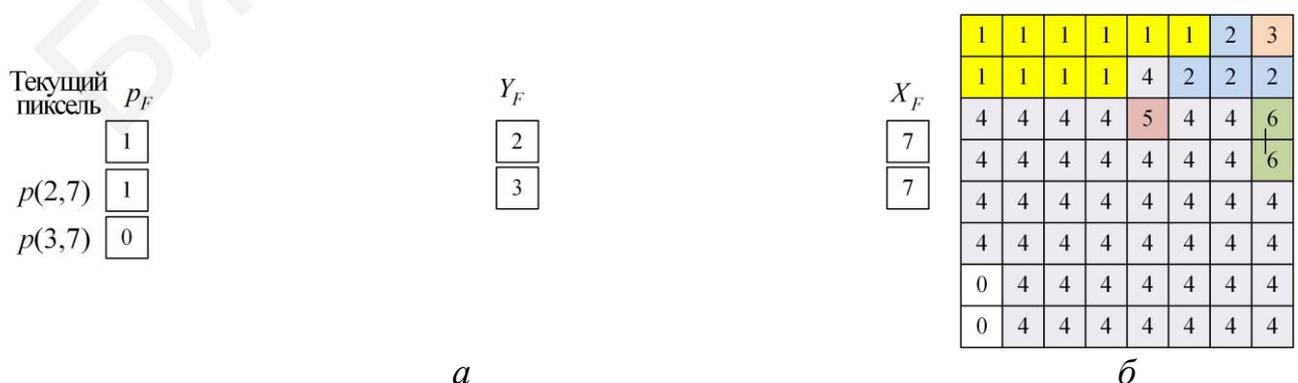


Рис. 3.9. Выделение области 6:

a – фрагмент диаграммы работы стеков; *б* – матрица сегментации

9) Выделение области 7. Инициализация указателя стеков: $p_F \leftarrow 0$. Выбор начального пикселя роста – $p(6,0)$. Загрузка координат начального пикселя роста в стек: $y_F(0) \leftarrow 6$, $x_F(0) \leftarrow 0$, $p_F \leftarrow p_F + 1$. Приращение номера сегмента: $n_S \leftarrow n_S + 1 \Rightarrow n_S = 7$. Текущему элементу матрицы сегментации $s(6,0)$ присваивается значение n_S номера сегмента: $s(6,0) \leftarrow 7$. Диаграмма работы стека приведена на рис. 3.10, а, матрица сегментации – на рис. 3.10, б.

Начало цикла обработки стеков Y_F и X_F .

Цикл обработки смежных пикселей в окрестности пикселя $p(6,0)$:

$$(p_F \leftarrow p_F - 1, y \leftarrow y_F(0), x \leftarrow x_F(0), \vec{Y}_F, \vec{X}_F) \Rightarrow (y=6, x=0, p_F=0);$$

$$s(7,0)=0 \text{ и } |p(6,0)-p(7,0)| \leq 5 \Rightarrow s(7,0) \leftarrow s(6,0) \Rightarrow s(7,0)=7;$$

$$y_F(0) \leftarrow 7, x_F(0) \leftarrow 0, p_F \leftarrow p_F + 1 \Rightarrow p_F=1.$$

Цикл обработки смежных пикселей в окрестности пикселя $p(7,0)$:

$$(p_F \leftarrow p_F - 1, y \leftarrow y_F(0), x \leftarrow x_F(0), \vec{Y}_F, \vec{X}_F) \Rightarrow (y=7, x=0, p_F=0);$$

в окрестности пикселя $p(7,0)$ нет присоединяемых пикселей.

Стек пуст – область 7 выделена – окончание цикла обработки стеков Y_F и X_F .

Сегментация завершена. Выделено семь областей.

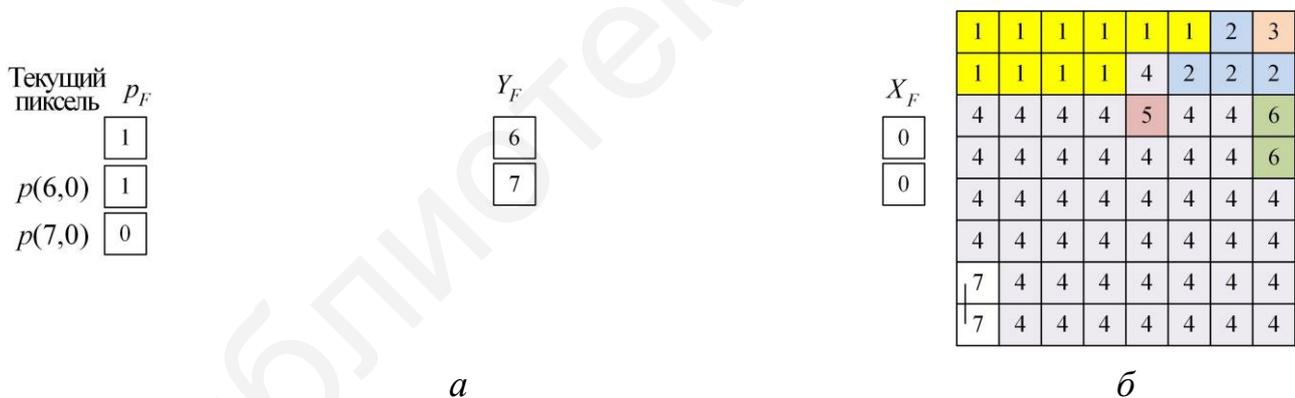


Рис. 3.10. Выделение области 7:

а – фрагмент диаграммы работы стеков; б – матрица сегментации

3.1.2. Для изображений $P = \|p(y, x)\|_{(y=0,7, x=0,7)}$, приведенных на рис. 3.1, исследовать влияние значения порога Δp в условии $|p(y, x) - p(y + y', x + x')| \leq \Delta p$

присоединения пикселей к области на результаты сегментации по алгоритму выращивания областей RG, приведенному в подразд. 1.1. Для этого выбрать значение порога больше или меньше по отношению к значению порога, выбранному по п. 3.1.1, не изменяя остальные условия (условие присоединения пикселей к области, порядок выборки смежных пикселей в окрестности текущего пикселя, порядок выборки новых пикселей роста на изображении, способ

назначения начальных пикселей роста, тип стеков Y_F и X_F для загрузки координат смежных пикселей). Построить временные диаграммы работы стеков координат смежных пикселей, сформировать матрицу сегментации $S(l) = \left\| s^{(l)}(y, x) \right\|_{\left(y=0, 2^{3-l}-1, x=0, 2^{3-l}-1 \right)}$. Сравнить результаты сегментации с результатами, полученными по п. 3.1.1 (оценить число и размеры сегментов).

Пример решения задачи для изображения $P1$, представленного на рис. 3.1, a , приводится в сокращенной форме без промежуточных выкладок, поскольку полностью аналогичен по последовательности и логике п. 3.1.1.

1) Пусть значение порога $\Delta p = 3$. Стеки Y_F и X_F заполняются слева направо (иначе, чем в п. 3.1.1); нумерация элементов стека начинается с нуля; первый (выгружаемый) элемент стека расположен в стеке всегда слева в позиции 0; после выгрузки очередного элемента стек сдвигается влево (\bar{Y}_F, \bar{X}_F); указатель стека p_F определяет свободную позицию в стеке для записи; после записи в стек указатель увеличивается; перед выгрузкой из стека указатель стека уменьшается; последний загруженный в стек элемент расположен всегда справа в позиции $p_F - 1$.

2) Инициализация номера сегментов: $n_S \leftarrow 0$.

3) Выделение области 1 (рис. 3.11, a). Выбор начального пикселя роста – $p(0,0)$. Приращение номера сегмента: $n_S = 1$.

$p(y, x)$	y	–	0
	x	–	0
y_F		0	–
x_F		0	–
p_F		1	0

4) Выделение области 2 (см. рис. 3.11, a). Выбор начального пикселя роста – $p(0,1)$. Приращение номера сегмента: $n_S = 2$.

$p(y, x)$	y	–	0	0	1	0	1	0	0
	x	–	1	2	2	3	3	4	5
y_F		0	0 1	1 0 1	0 1	1 0	0 0	–	–
x_F		1	2 2	2 3 3	3 3	3 4	4 5	–	–
p_F		1	1 2	1 2 3	2	1 2	1 1	0	0

5) Выделение области 3 (см. рис. 3.11, a). Выбор начального пикселя роста – $p(0,6)$. Приращение номера сегмента: $n_S = 3$.

$p(y, x)$	y	–	0
	x	–	6
y_F		0	–
x_F		6	–
p_F		1	0

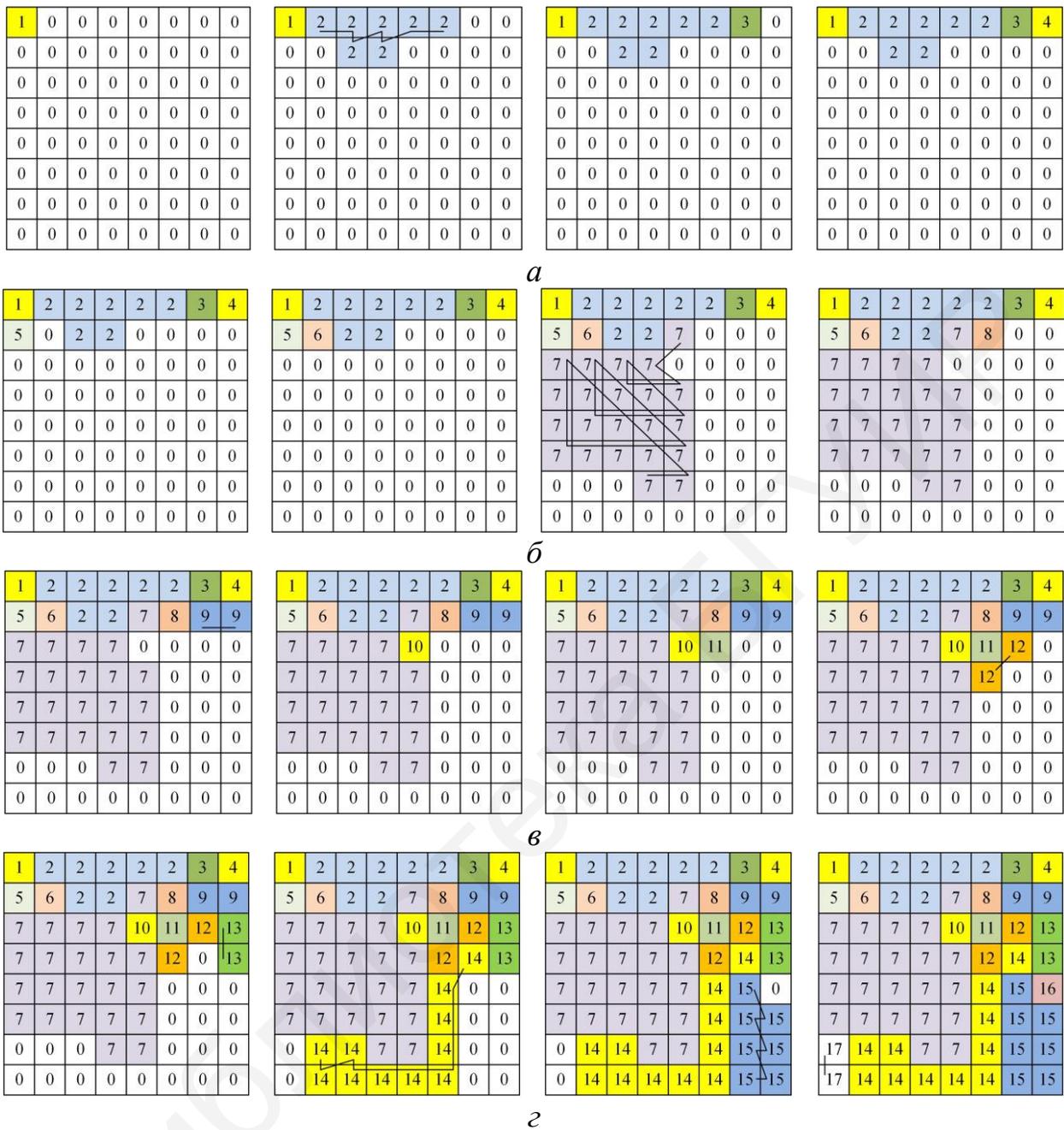


Рис. 3.11. Выделение областей при $\Delta p = 3$:

а – области 1–4; *б* – области 5–8; *в* – области 9–12; *г* – области 13–17

б) Выделение области 4 (см. рис. 3.11, *а*). Выбор начального пикселя роста – $p(0,7)$. Приращение номера сегмента: $n_s = 4$.

$p(y, x)$	y	–	0
	x	–	7
y_F		0	–
x_F		7	–
p_F		1	0

7) Выделение области 5 (рис. 3.11, б). Выбор начального пикселя роста – $p(1,0)$. Приращение номера сегмента: $n_s = 5$.

$p(y,x)$	y	–	1
	x	–	0
y_F		1	–
x_F		0	–
p_F		1	0

8) Выделение области 6 (см. рис. 3.11, б). Выбор начального пикселя роста – $p(1,1)$. Приращение номера сегмента: $n_s = 6$.

$p(y,x)$	y	–	1
	x	–	1
y_F		1	–
x_F		1	–
p_F		1	0

9) Выделение области 7 (см. рис. 3.11, б). Выбор начального пикселя роста – $p(1,4)$. Приращение номера сегмента: $n_s = 7$.

$p(y,x)$	y	–	1	2	3	3	3	2
	x	–	4	3	4	3	2	2
y_F		1	2	3 3 3 2	3 3 2 4 4	3 2 4 4	2 4 4 4 4 3 2	4 4 4 4 3 2
x_F		4	3	4 3 2 2	3 2 2 4 3	2 2 4 3	2 4 3 2 1 1 1	4 3 2 1 1 1
p_F		1	1	1 2 3 4	3 4 5	4	3 4 5 6 7	6

$p(y,x)$	y	4	4	4	4
	x	4	3	2	1
y_F		4 4 4 3 2 5	4 4 3 2 5 5	4 3 2 5 5 5 5	3 2 5 5 5 5 5 4
x_F		3 2 1 1 1 4	2 1 1 1 4 3	1 1 1 4 3 2 1	1 1 4 3 2 1 0 0
p_F		5 6	5 6	5 6 7	6 7 8

$p(y,x)$	y	3	2	5	5
	x	1	1	4	3
y_F		2 5 5 5 5 5 4 3 2	5 5 5 5 5 4 3 2	5 5 5 5 4 3 2 6 6	5 5 5 4 3 2 6 6
x_F		1 4 3 2 1 0 0 0 0	4 3 2 1 0 0 0 0	3 2 1 0 0 0 0 4 3	2 1 0 0 0 0 4 3
p_F		7 8 9	8	7 8 9	8

$p(y,x)$	y	5	5	5	4	3	2	6	6
	x	2	1	0	0	0	0	4	3
y_F		5 5 4 3 2 6 6	5 4 3 2 6 6	4 3 2 6 6	3 2 6 6	2 6 6	6 6	6	–
x_F		1 0 0 0 0 4 3	0 0 0 0 4 3	0 0 0 4 3	0 0 4 3	0 4 3	4 3	3	–
p_F		7	6	5	4	3	2	1	0

10) Выделение области 8 (см. рис. 3.11, б). Выбор начального пикселя роста – $p(1,5)$. Приращение номера сегмента: $n_s = 8$.

$p(y,x)$	y	–	1
	x	–	5
y_F		1	–
x_F		5	–
p_F		1	0

11) Выделение области 9 (рис. 3.11, в). Выбор начального пикселя роста – $p(1,6)$. Приращение номера сегмента: $n_s = 9$.

$p(y,x)$	y	–	1	1
	x	–	6	7
y_F		1	1	–
x_F		6	7	–
p_F		1	1	0

12) Выделение области 10 (см. рис. 3.11, в). Выбор начального пикселя роста – $p(2,4)$. Приращение номера сегмента: $n_s = 10$.

$p(y,x)$	y	–	2
	x	–	4
y_F		2	–
x_F		4	–
p_F		1	0

13) Выделение области 11 (см. рис. 3.11, в). Выбор начального пикселя роста – $p(2,5)$. Приращение номера сегмента: $n_s = 11$.

$p(y,x)$	y	–	2
	x	–	5
y_F		2	–
x_F		5	–
p_F		1	0

14) Выделение области 12 (см. рис. 3.11, в). Выбор начального пикселя роста – $p(2,6)$. Приращение номера сегмента: $n_s = 12$.

$p(y,x)$	y	–	2	3
	x	–	6	5
y_F		2	3	–
x_F		6	5	–
p_F		1	1	0

15) Выделение области 13 (рис. 3.11, z). Выбор начального пикселя роста – $p(2,7)$. Приращение номера сегмента: $n_s = 13$.

$p(y, x)$	y	–	2	3
	x	–	7	7
y_F		2	3	–
x_F		7	7	–
p_F		1	1	0

16) Выделение области 14 (см. рис. 3.11, z). Выбор начального пикселя роста – $p(3,6)$. Приращение номера сегмента: $n_s = 14$.

$p(y, x)$	y	–	3	4	5	6	7	7	7	7	6	7	6
	x	–	6	5	5	5	5	4	3	2	2	1	1
y_F		3	4	5	6	7	7	7	7	6	6	7	6
x_F		6	5	5	5	5	4	3	2	2	1	1	–
p_F		1	1	1	1	1	2	1	1	1	2	3	2

17) Выделение области 15 (см. рис. 3.11, z). Выбор начального пикселя роста – $p(4,6)$. Приращение номера сегмента: $n_s = 15$.

$p(y, x)$	y	–	4	5	5	6	6	7	7
	x	–	6	7	6	7	6	7	6
y_F		4	5	5	5	6	6	7	7
x_F		6	7	6	6	7	6	7	6
p_F		1	1	2	1	2	3	2	1

18) Выделение области 16 (см. рис. 3.11, z). Выбор начального пикселя роста – $p(4,7)$. Приращение номера сегмента: $n_s = 16$.

$p(y, x)$	y	–	4
	x	–	7
y_F		4	–
x_F		7	–
p_F		1	0

19) Выделение области 17 (см. рис. 3.11, z). Выбор начального пикселя роста – $p(6,0)$. Приращение номера сегмента: $n_s = 17$.

$p(y, x)$	y	–	6	7
	x	–	0	0
y_F		6	7	–
x_F		0	0	–
p_F		1	0	0

Сегментация завершена. Выделено 17 областей. Самая большая область насчитывает 21 пиксель.

3.1.3. Для изображений $P = \|p(y, x)\|_{(y=0,7, x=0,7)}$, приведенных на рис. 3.1, исследовать влияние условия присоединения пикселей к области на результаты сегментации по алгоритму выращивания областей RG, приведенному в подразд. 1.1. Для этого изменить условие присоединения пикселей к области по отношению к условию, используемому по п. 3.1.1, не изменяя остальные условия (значение порога, порядок выборки смежных пикселей в окрестности текущего пикселя, порядок выборки новых пикселей роста, способ назначения начальных пикселей роста, тип стеков Y_F и X_F). Построить временные диаграммы работы стеков координат смежных пикселей, сформировать матрицу сегментации $S = \|s(y, x)\|_{(y=0,2^{3-l}-1, x=0,2^{3-l}-1)}$. Сравнить результаты сегментации с результатами, полученными по п. 3.1.1.

Пример решения задачи для изображения $P1$, представленного на рис. 3.1, *a*, приводится в сокращенной форме без промежуточных выкладок, поскольку полностью аналогичен по последовательности и логике п. 3.1.1.

1) Пусть условие присоединения пикселей к области определяется выражением $|p(y_s, x_s) - p(y + y', x + x')| \leq \Delta p$, где $p(y_s, x_s)$ – начальный пиксель роста; $p(y + y', x + x')$ – смежный пиксель в окрестности текущего пикселя $p(y, x)$; $y' = \{-1, 0, 1\}$; $x' = \{-1, 0, 1\}$. Стеки Y_F и X_F заполняются слева направо (иначе, чем в п. 3.1.1); нумерация элементов стека начинается с нуля; первый (выгружаемый) элемент стека расположен в стеке всегда слева в позиции 0; после выгрузки очередного элемента стек сдвигается влево (\tilde{Y}_F, \tilde{X}_F); указатель стека p_F определяет свободную позицию в стеке для записи; после записи в стек указатель увеличивается; перед выгрузкой из стека указатель стека уменьшается; последний загруженный в стек элемент расположен всегда справа в позиции $p_F - 1$.

2) Инициализация номера сегментов: $n_s \leftarrow 0$.

3) Выделение области 1 (рис. 3.12, *a*). Выбор начального пикселя роста – $p(0,0)$. Приращение номера сегмента: $n_s = 1$.

4) Выделение области 2 (см. рис. 3.12, *a*). Выбор начального пикселя роста – $p(0,1)$. Приращение номера сегмента: $n_s = 2$.

4) Выделение области 2 (см. рис. 3.12, *a*). Выбор начального пикселя роста – $p(0,1)$. Приращение номера сегмента: $n_s = 2$.

$p(y, x)$	y	–	0	1
	x	–	0	0
y_F		0	1	–
x_F		0	0	–
p_F		1	1	0

4) Выделение области 2 (см. рис. 3.12, *a*). Выбор начального пикселя роста – $p(0,1)$. Приращение номера сегмента: $n_s = 2$.

$p(y, x)$	y	–	0	0	1	1	1
	x	–	1	2	2	1	3
y_F		0	0 1 1	1 1 1	1 1	1	–
x_F		1	2 2 1	2 1 3	1 3	3	–
p_F		1	1 2 3	2 3	2	1	0

5) Выделение области 3 (см. рис. 3.12, а). Выбор начального пикселя роста – $p(0,3)$. Приращение номера сегмента: $n_S = 3$.

$p(y, x)$	y	–	0	0	0
	x	–	3	4	5
y_F		0	0	0	–
x_F		3	4	5	–
p_F		1	1	1	0

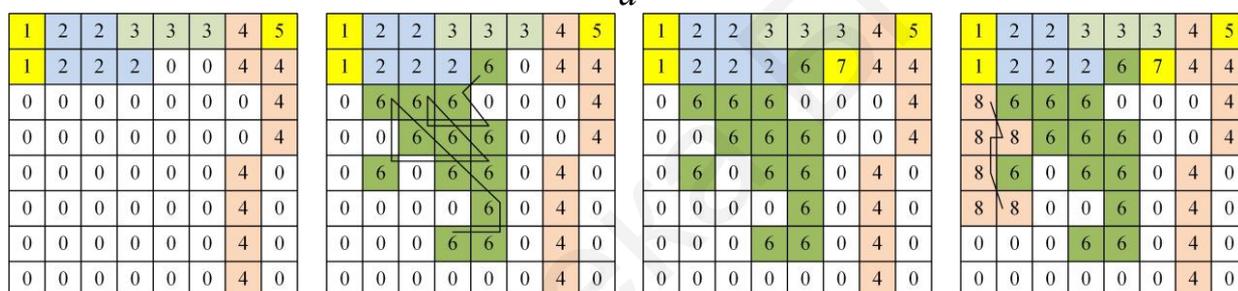
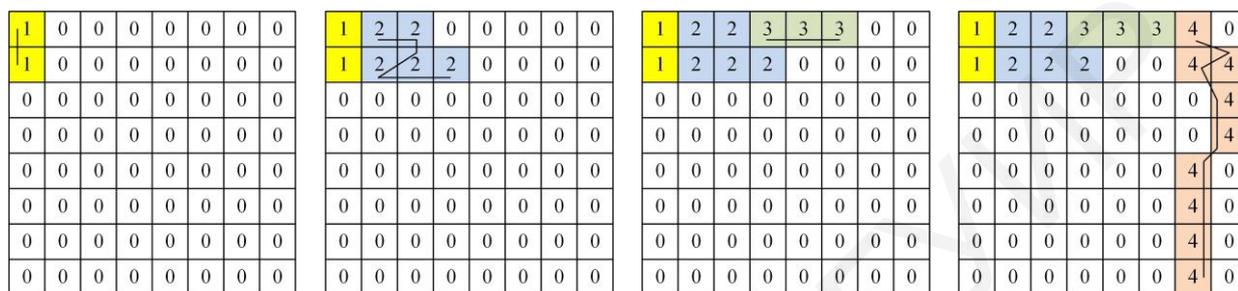


Рис. 3.12. Выделение областей при сравнении значений присоединяемых пикселей с начальным пикселем роста:
 а – области 1–4; б – области 5–8; в – области 9–14

6) Выделение области 4 (см. рис. 3.12, а). Выбор начального пикселя роста – $p(0,6)$. Приращение номера сегмента: $n_S = 4$.

$p(y, x)$	y	–	0	1	1	2	3	4	5	6	7
	x	–	6	7	6	7	7	6	6	6	6
y_F		0	1	1	2	3	4	5	6	7	–
x_F		6	7	6	7	7	6	6	6	6	–
p_F		1	1	2	1	1	1	1	1	1	0

7) Выделение области 5 (рис. 3.12, б). Выбор начального пикселя роста – $p(0,7)$. Приращение номера сегмента: $n_s = 5$.

$p(y, x)$	y	–	0
	x	–	7
y_F		0	–
x_F		7	–
p_F		1	0

8) Выделение области 6 (см. рис. 3.12, б). Выбор начального пикселя роста – $p(1,4)$. Приращение номера сегмента: $n_s = 6$.

$p(y, x)$	y	–	1	2	3	3	3	2	4	4
	x	–	4	3	4	3	2	2	4	3
y_F		1	2	3 3 3 2	3 3 2 4 4	3 2 4 4	2 4 4 4 2	4 4 4 2	4 4 2 5	4 2 5
x_F		4	3	4 3 2 2	3 2 2 4 3	2 2 4 3	2 4 3 1 1	4 3 1 1	3 1 1 4	1 1 4
p_F		1	1	1 2 3 4	3 4 5	4	3 4 5	4	3 4	3

$p(y, x)$	y	4	2	5	6	6
	x	1	1	4	4	3
y_F		2 5	5	6 6	6	–
x_F		1 4	4	4 3	3	–
p_F		2	1	1 2	1	0

9) Выделение области 7 (см. рис. 3.12, б). Выбор начального пикселя роста – $p(1,5)$. Приращение номера сегмента: $n_s = 7$.

$p(y, x)$	y	–	1
	x	–	5
y_F		1	–
x_F		5	–
p_F		1	0

10) Выделение области 8 (см. рис. 3.12, б). Выбор начального пикселя роста – $p(2,0)$. Приращение номера сегмента: $n_s = 8$.

$p(y, x)$	y	–	2	3	3	4	5	5
	x	–	0	1	0	0	1	0
y_F		2	3 3	3 4	4	5 5	5	–
x_F		0	1 0	0 0	0	1 0	0	–
p_F		1	1 2	1 2	1	1 2	1	0

11) Выделение области 9 (рис. 3.12, в). Выбор начального пикселя роста – $p(2,4)$. Приращение номера сегмента: $n_s = 9$.

$p(y, x)$	y	–	2
	x	–	4
y_F		2	–
x_F		4	–
p_F		1	0

12) Выделение области 10 (см. рис. 3.12, в). Выбор начального пикселя роста – $p(2,5)$. Приращение номера сегмента: $n_s = 10$.

$p(y, x)$	y	–	2	2	3	3
	x	–	5	6	6	5
y_F		2	2 3 3	3 3	3	–
x_F		5	6 6 5	6 5	5	–
p_F		1	1 2 3	2	1	0

13) Выделение области 11 (см. рис. 3.12, в). Выбор начального пикселя роста – $p(4,2)$. Приращение номера сегмента: $n_s = 11$.

$p(y, x)$	y	–	4	5	5
	x	–	2	3	2
y_F		4	5 5	5	–
x_F		2	3 2	2	–
p_F		1	1 2	1	1

14) Выделение области 12 (см. рис. 3.12, в). Выбор начального пикселя роста – $p(4,5)$. Приращение номера сегмента: $n_s = 12$.

$p(y, x)$	y	–	4	5	6	7	7	7	7	6	7	6
	x	–	5	5	5	5	4	3	2	2	1	1
y_F		4	5	6	7 7	7	7	7 6	6 7 6	7 6	6	–
x_F		5	5	5	5 4	4	3	2 2	2 1 1	1 1	1	–
p_F		1	1	1	1 2	1	1	1 2	1 2 3	2	1	0

15) Выделение области 13 (см. рис. 3.12, в). Выбор начального пикселя роста – $p(4,7)$. Приращение номера сегмента: $n_s = 13$.

$p(y, x)$	y	–	4	5	6	7
	x	–	7	7	7	7
y_F		4	5	6	7	–
x_F		7	7	7	7	–
p_F		1	1	1	1	0

16) Выделение области 14 (см. рис. 3.12, в). Выбор начального пикселя роста – $p(6,0)$. Приращение номера сегмента: $n_s = 14$.

$p(y, x)$	y	–	6	7
	x	–	0	0
y_F		6	7	–
x_F		0	0	–
p_F		1	1	0

Сегментация завершена. Выделено 14 областей. Самая большая область насчитывает 12 пикселей.

3.1.4. Для изображений $P = \left\| p(y, x) \right\|_{(y=0,7, x=0,7)}$, приведенных на рис. 3.1, и

условия присоединения пикселей к области, использованного в п. 3.1.3, исследовать влияние порядка выборки смежных пикселей в окрестности текущего пикселя и порядка выборки новых пикселей роста на изображении на результаты сегментации по алгоритму выращивания областей RG, приведенному в подразд. 1.1. Для этого повернуть выбранное исходное изображение на 90° , 180° или 270° , не изменяя остальные условия (порядок выборки смежных пикселей в окрестности текущего пикселя, порядок выборки новых пикселей роста на изображении, значение порога, способ назначения начальных пикселей роста, тип стеков Y_F и X_F координат смежных пикселей). В данном случае поворот исходного изображения эквивалентен изменению порядка выборки смежных пикселей в окрестности текущего пикселя и порядка выборки новых пикселей роста на изображении одновременно. Построить временные диаграммы работы стеков координат смежных пикселей, сформировать матрицу сегментации $S = \left\| s(y, x) \right\|_{(y=0,2^{3-l}-1, x=0,2^{3-l}-1)}$. Сравнить результаты сегментации с результатами, полученными по п. 3.1.3. Изменяться ли результаты сегментации при изменении типа стеков Y_F и X_F координат смежных пикселей и порядка их работы.

Пример решения задачи для изображения $P1$, представленного на рис. 3.1, *а*, приводится без промежуточных выкладок, поскольку полностью аналогичен по последовательности и логике п. 3.1.1. На рис. 3.13, *а* представлено исходное изображение, полученное из изображения $P1$, повернутого на 90° по часовой стрелке. На рис. 3.13, *б* приведена результирующая матрица сегментации, а на рис. 3.13, *в* – результирующая матрица сегментации, повернутая на 90° против часовой стрелки. В результате сегментации выделено 11 областей. Самая большая область насчитывает 13 пикселей.

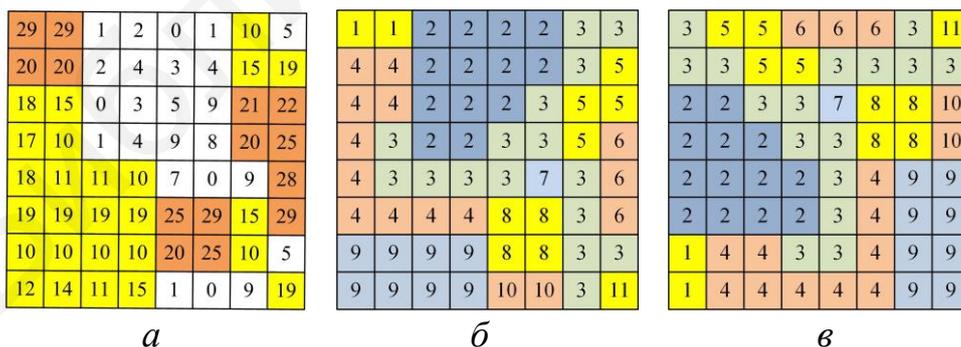


Рис. 3.13. Сегментация изображения с поворотами при сравнении значений присоединяемых пикселей с начальным пикселем роста:
а – изображение, полученное поворотом изображения $P1$;
б – матрица сегментации; *в* – повернутая матрица сегментации

3.1.5. Для изображений $P = \|p(y, x)\|_{(y=0,7, x=0,7)}$, приведенных на рис. 3.1, исследовать влияние типа стеков Y_F и X_F координат смежных пикселей и порядка их работы на результаты сегментации по алгоритму выращивания областей RG, приведенному в подразд. 1.1. Для этого выбрать тип стеков Y_F и X_F , отличный от выбранного по п. 3.1.1, не изменяя остальные условия (условие присоединения пикселей к области, значение порога, порядок выборки смежных пикселей, порядок выборки новых пикселей роста, способ назначения начальных пикселей роста). Построить временные диаграммы работы стеков координат смежных пикселей, сформировать матрицу сегментации $S = \|s(y, x)\|_{(y=0,2^{3-l}-1, x=0,2^{3-l}-1)}$. Сравнить результаты сегментации с результатами, полученными по п. 3.1.1. Сравнить загрузку стеков LIFO и FIFO при сегментации максимальной по размеру области.

Пример решения задачи для изображения $P1$, приведенного на рис. 3.1, a :

1) Пусть: значение порога $\Delta p = 5$; порядок выборки смежных пикселей в окрестности текущего пикселя происходит по часовой стрелке относительно правого верхнего угла области смежных пикселей; порядок выборки новых пикселей роста происходит слева направо, сверху вниз; начальные пиксели роста заранее не назначаются; тип стеков Y_F и X_F для загрузки координат смежных пикселей – LIFO; стеки Y_F и X_F заполняются слева направо (иначе, чем в п. 3.1.1); нумерация элементов стека начинается с нуля; первый (выгружаемый) элемент стека расположен в стеке всегда слева в позиции 0; после выгрузки очередного элемента стек сдвигается влево (\tilde{Y}_F, \tilde{X}_F); указатель стека p_F указывает на число элементов в стеке; после записи в стек указатель увеличивается; перед выгрузкой из стека указатель стека уменьшается; последний загруженный в стек элемент расположен всегда слева в позиции 0.

2) Инициализация номера сегментов: $n_s \leftarrow 0$.

3) Выделение области 1 (рис. 3.14). Выбор начального пикселя роста – $p(0,0)$. Приращение номера сегмента: $n_s = 1$.

$p(y, x)$	y	–	0	1	1	0	1	1	0	0	0	0
	x	–	0	0	1	1	2	3	3	4	5	2
y_F		0	1	1	0	1 0	1 0 0	0 0	0 0	0 0	0	–
x_F		0	0	1	1	2 2	3 3 2	3 2	4 2	5 2	2	–
p_F		1	1	1	1	1 2	1 2 3	1 2	1 2	1 2	1	0

4) Выделение области 2 (см. рис. 3.14). Выбор начального пикселя роста – $p(0,6)$. Приращение номера сегмента: $n_s = 2$.

$p(y, x)$	y	–	0	1	1	1
	x	–	6	6	5	7
y_F		0	1 1	1 1	1	–
x_F		6	6 7	5 7	7	–
p_F		1	1 2	1 2	1	0

5) Выделение области 3 (см. рис. 3.14). Выбор начального пикселя роста – $p(0,7)$. Приращение номера сегмента: $n_s = 3$.

$p(y,x)$	y	–	0
	x	–	7
y_F		0	–
x_F		7	–
p_F		1	0

6) Выделение области 4 (см. рис. 3.14). Выбор начального пикселя роста – $p(1,4)$. Приращение номера сегмента: $n_s = 4$.

$p(y,x)$	y	–	1	2	2	2	2	3
	x	–	4	3	2	1	0	0
y_F		1	2	2 3 3 3	2 3 3 3	2 3 3 3 3 3	3 3 3 3 3 3	4 4 3 3 3 3
x_F		4	3	2 2 3 4	1 2 3 4	0 0 1 2 3 4	0 1 2 3 4	0 1 1 2 3 4
p_F		1	1	1 2 3 4	1 2 3 4	1 2 3 4 5 6	1 2 3 4 5	1 2 3 4 5 6

$p(y,x)$	y	4	5	5	5	5
	x	0	0	1	2	3
y_F		5 5 4 3 3 3 3	5 4 3 3 3 3 3	5 4 4 3 3 3 3 3	5 4 4 4 3 3 3 3 3	4 4 4 3 3 3 3 3
x_F		0 1 1 1 2 3 4	1 1 1 2 3 4	2 2 1 1 2 3 4	3 3 2 1 1 2 3 4	3 2 1 1 2 3 4
p_F		1 2 3 4 5 6 7	1 2 3 4 5 6	1 2 3 4 5 6 7	1 2 3 4 5 6 7 8	1 2 3 4 5 6 7

$p(y,x)$	y	4	4	4	3	3	3	4	5
	x	3	2	1	1	2	3	4	4
y_F		4 4 3 3 3 3 3	4 3 3 3 3 3	3 3 3 3 3	3 3 3	3 3	4 3	5 3	6 6 3
x_F		2 1 1 2 3 4	1 1 2 3 4	1 2 3 4	2 3 4	3 4	4 4	4 4	3 4 4
p_F		1 2 3 4 5 6	1 2 3 4 5	1 2 3 4	1 2 3	1 2	1 2	1 2	1 2 3

$p(y,x)$	y	6	6	6	7	7	7	7
	x	3	2	1	1	2	3	4
y_F		6 6 3	6 7 7 7 6 3	7 7 7 6 3	7 7 6 3	7 6 3	7 6 3	7 6 6 3
x_F		2 4 4	1 1 2 3 4 4	1 2 3 4 4	2 3 4 4	3 4 4	4 4 4	5 5 4 4
p_F		1 2 3	1 2 3 4 5 6	1 2 3 4 5	1 2 3 4	1 2 3	1 2 3	1 2 3 4

$p(y,x)$	y	7	6	5	4	3	2	2	3
	x	5	5	5	5	6	6	5	5
y_F		6 6 3	5 6 3	4 6 3	3 6 3	2 3 4 6 3	2 3 4 6 3	3 4 6 3	4 6 3
x_F		5 4 4	5 4 4	5 4 4	6 4 4	6 5 7 4 4	5 5 7 4 4	5 7 4 4	7 4 4
p_F		1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3 4 5	1 2 3 4 5	1 2 3 4	1 2 3

$p(y,x)$	y	4	4	5	6	7	7	6
	x	7	6	6	6	6	7	7
y_F		4 5 5 6 3	5 5 6 3	6 6 5 6 3	7 7 6 5 6 3	7 6 5 6 3	6 5 6 3	5 6 3
x_F		6 6 7 4 4	6 7 4 4	6 7 7 4 4	6 7 7 7 4 4	7 7 7 4 4	7 7 4 4	7 4 4
p_F		1 2 3 4 5	1 2 3 4	1 2 3 4 5	1 2 3 4 5 6	1 2 3 4 5	1 2 3 4	1 2 3

$p(y, x)$	y	5	6	3
	x	7	4	4
y_F		6	3	—
x_F		4	4	—
p_F		1	2	0

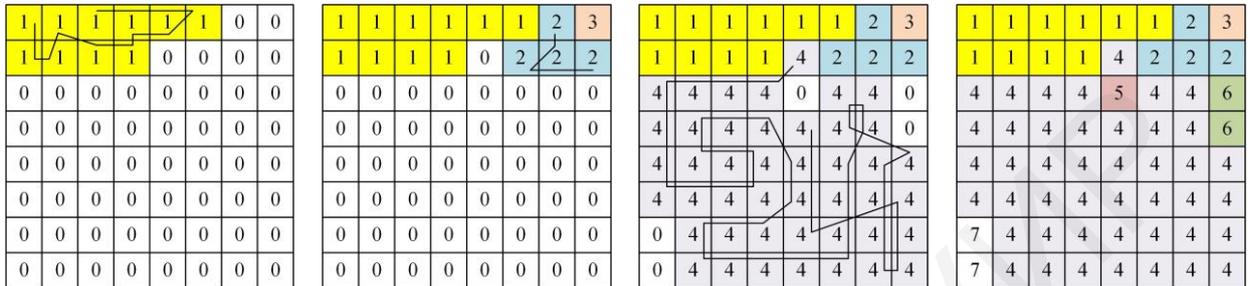


Рис. 3.14. Выделение областей при сравнении значений присоединяемых пикселей с начальным пикселем роста

7) Выделение области 5 (см. рис. 3.14). Выбор начального пикселя роста — $p(2,4)$. Приращение номера сегмента: $n_s = 5$.

$p(y, x)$	y	—	2
	x	—	4
y_F		2	—
x_F		4	—
p_F		1	0

8) Выделение области 6 (см. рис. 3.14). Выбор начального пикселя роста — $p(2,7)$. Приращение номера сегмента: $n_s = 6$.

$p(y, x)$	y	—	2	3
	x	—	7	7
y_F		2	3	—
x_F		7	7	—
p_F		1	1	0

9) Выделение области 7 (см. рис. 3.14). Выбор начального пикселя роста — $p(6,0)$. Приращение номера сегмента: $n_s = 7$.

$p(y, x)$	y	—	6	7
	x	—	0	0
y_F		6	7	—
x_F		0	0	—
p_F		1	1	0

Сегментация завершена. Выделено семь областей. Самая большая область насчитывает 44 пикселя.

3.1.6. Для изображений $P = \left\| p(y, x) \right\|_{(y=0,7, x=0,7)}$, приведенных на рис. 3.1, исследовать влияние способа назначения начальных пикселей роста на результаты сегментации по алгоритму выращивания областей RG, приведенному в подразд. 1.1. Для этого изменить способ назначения начальных пикселей роста по отношению к способу, используемому в п. 3.1.3, не изменяя условие присоединения пикселей к области, значение порога, порядок выборки смежных пикселей в окрестности текущего пикселя, порядок выборки новых пикселей роста на изображении, тип стеков Y_F и X_F координат смежных пикселей и порядок их работы такие же, как в п. 3.1.5. Построить временные диаграммы работы стеков координат смежных пикселей, сформировать матрицу сегментации $S = \left\| s(y, x) \right\|_{(y=0,2^{3-l}-1, x=0,2^{3-l}-1)}$. Сравнить результаты сегментации с результатами, полученными по п. 3.1.3.

Пример решения задачи для изображения $P1$, приведенного на рис. 3.1, a :

1) Пусть условие присоединения пикселей к области определяется выражением $|p(y_s, x_s) - p(y + y', x + x')| \leq \Delta p$, где $p(y_s, x_s)$ – начальный пиксель роста; $p(y + y', x + x')$ – смежный пиксель в окрестности текущего пикселя $p(y, x)$; $y' = \{-1, 0, 1\}$; $x' = \{-1, 0, 1\}$. Значение порога $\Delta p = 5$; порядок выборки смежных пикселей в окрестности текущего пикселя происходит по часовой стрелке относительно правого верхнего угла области смежных пикселей; порядок выборки новых пикселей роста на изображении происходит слева направо, сверху вниз; начальные пиксели роста имеют следующие координаты: (0,3); (1,1); (1,6); (3,2); (3,5); (6,0); (6,7). Тип стеков Y_F и X_F для загрузки координат смежных пикселей – LIFO; стеки Y_F и X_F заполняются слева направо; нумерация элементов стека начинается с нуля; первый (выгружаемый) элемент стека расположен в стеке всегда слева в позиции 0; после выгрузки очередного элемента стек сдвигается влево (\tilde{Y}_F, \tilde{X}_F); указатель стека p_F указывает на число элементов в стеке; после записи в стек указатель увеличивается; перед выгрузкой из стека указатель стека уменьшается; последний загруженный в стек элемент расположен всегда слева в позиции 0.

2) Инициализация номера сегментов: $n_s \leftarrow 0$.

3) Выделение области 1 (рис. 3.15). Выбор начального пикселя роста – $p(0,3)$. Приращение номера сегмента: $n_s = 1$.

2) Инициализация номера сегментов: $n_s \leftarrow 0$.

3) Выделение области 1 (рис. 3.15). Выбор начального пикселя роста – $p(0,3)$. Приращение номера сегмента: $n_s = 1$.

$p(y, x)$	y	–	0	0	1	1	0	0
	x	–	3	2	2	3	4	5
y_F		0	0 1 1 0	1 1 0	1 0	0	0	–
x_F		3	2 2 3 4	2 3 4	3 4	4	5	–
p_F		1	1 2 3 4	1 2 3 4	1 2	1	1	0

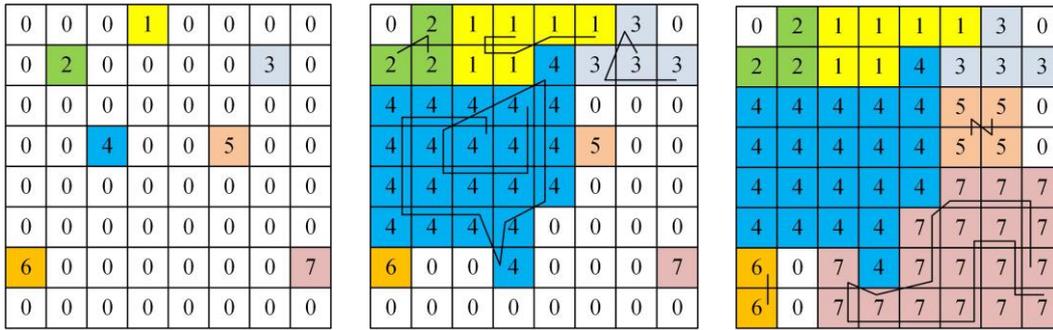


Рис. 3.15. Выделение областей при сравнении значений присоединяемых пикселей с начальным пикселем роста

4) Выделение области 2 (см. рис. 3.15). Выбор начального пикселя роста – $p(1,1)$. Приращение номера сегмента: $n_s = 2$.

$p(y,x)$	y	–	1	0	1	
	x	–	1	1	1	
y_F		1	0	1	1	–
x_F		1	1	0	0	–
p_F		1	1	2	1	0

5) Выделение области 3 (см. рис. 3.15). Выбор начального пикселя роста – $p(1,6)$. Приращение номера сегмента: $n_s = 3$.

$p(y,x)$	y	–	1		0	1	1		
	x	–	6		6	5	7		
y_F		1	0	1	1	1	–		
x_F		6	6	5	7	5	7	–	
p_F		1	1	2	3	1	2	1	0

6) Выделение области 4 (см. рис. 3.15). Выбор начального пикселя роста – $p(3,2)$. Приращение номера сегмента: $n_s = 4$.

$p(y,x)$	y	–	3			2		2		2																						
	x	–	2			2		1		0																						
y_F		3	2	2	3	4	4	4	3	2	2	3	3	4	4	4	3	2														
x_F		2	2	1	1	1	2	3	3	3	1	1	1	2	3	3	3	0	0	1	1	2	3	3	3	0	1	1	2	3	3	3
p_F		1	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5	6	7	

$p(y,x)$	y	3		4		5		5																						
	x	0		0		0		1																						
y_F		4	3	4	4	4	3	2	5	5	3	4	4	4	3	2	5	3	4	4	4	3	2	5	3	4	4	4	3	2
x_F		0	1	1	2	3	3	3	0	1	1	1	2	3	3	3	1	1	1	2	3	3	3	2	1	1	2	3	3	3
p_F		1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5	6	7

$p(y,x)$	y	5	6	5	4
	x	2	3	3	4
y_F		6 5 3 4 4 4 3 2	5 3 4 4 4 3 2	4 3 4 4 4 3 2	3 3 4 4 4 3 2
x_F		3 3 1 1 2 3 3 3	3 1 1 2 3 3 3	4 1 1 2 3 3 3	4 1 1 2 3 3 3
p_F		1 2 3 4 5 6 7 8	1 2 3 4 5 6 7	1 2 3 4 5 6 7	1 2 3 4 5 6 7

$p(y,x)$	y	3	2	1	3	4
	x	4	4	4	1	1
y_F		2 3 4 4 4 3 2	1 3 4 4 4 3 2	3 4 4 4 3 2	4 4 4 3 2	4 4 3 2
x_F		4 1 1 2 3 3 3	4 1 1 2 3 3 3	1 1 2 3 3 3	1 2 3 3 3	2 3 3 3
p_F		1 2 3 4 5 6 7	1 2 3 4 5 6 7	1 2 3 4 5 6	1 2 3 4 5	1 2 3 4

$p(y,x)$	y	4	4	3	2
	x	2	3	3	3
y_F		4 3 2	3 2	2	–
x_F		3 3 3	3 3	3	–
p_F		1 2 3	1 2	1	0

7) Выделение области 5 (см. рис. 3.15). Выбор начального пикселя роста – $p(3,5)$. Приращение номера сегмента: $n_s = 5$.

$p(y,x)$	y	–	3	2	3	2
	x	–	5	5	6	6
y_F		3	2 3 2	3 2	2	–
x_F		5	5 6 6	6 6	6	–
p_F		1	1 2 3	1 2	1	0

8) Выделение области 6 (см. рис. 3.15). Выбор начального пикселя роста – $p(6,0)$. Приращение номера сегмента: $n_s = 6$.

$p(y,x)$	y	–	6	7
	x	–	0	0
y_F		6	7	–
x_F		0	0	–
p_F		1	1	0

9) Выделение области 7 (см. рис. 3.15). Выбор начального пикселя роста – $p(6,7)$. Приращение номера сегмента: $n_s = 7$.

$p(y,x)$	y	–	6	7	5	4	4	4
	x	–	7	0	7	7	6	5
y_F		6	7	5 5 6 7 7	4 4 5 6 7 7	4 5 6 7 7	4 5 5 6 7 7	5 5 5 6 7 7
x_F		7	0	7 6 6 6 7	7 6 6 6 6 7	6 6 6 6 7	5 5 6 6 6 7	4 5 6 6 6 7
p_F		1	1	1 2 3 4 5	1 2 3 4 5 6	1 2 3 4 5	1 2 3 4 5 6	1 2 3 4 5 6

$p(y, x)$	y	5	6	7	6
	x	4	4	3	2
y_F		6 6 5 5 6 7 7	7 7 7 6 5 5 6 7 7	6 7 7 7 6 5 5 6 7 7	7 7 7 6 5 5 6 7 7
x_F		4 5 5 6 6 6 7	3 4 5 5 5 6 6 6 7	2 2 4 5 5 5 6 6 6 7	2 4 5 5 5 6 6 6 7
p_F		1 2 3 4 5 6 7	1 2 3 4 5 6 7 8 9	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	1 2 3 4 5 6 7 8 9

$p(y, x)$	y	7	7	7	6	5	5
	x	2	4	5	5	5	6
y_F		7 7 6 5 5 6 7 7	7 6 5 5 6 7 7	6 5 5 6 7 7	5 5 6 7 7	5 6 7 7	6 7 7
x_F		4 5 5 5 6 6 6 7	5 5 5 6 6 6 7	5 5 6 6 6 7	5 6 6 6 7	6 6 6 7	6 6 7
p_F		1 2 3 4 5 6 7 8	1 2 3 4 5 6 7	1 2 3 4 5 6	1 2 3 4 5	1 2 3 4	1 2 3

$p(y, x)$	y	6	7	7
	x	6	6	7
y_F		7 7	7	–
x_F		6 7	7	–
p_F		1 2	1	0

Сегментация завершена. Выделено семь областей. Не сегментированы четыре области.

3.1.7. Для изображений $P = \|p(y, x)\|_{(y=0, \bar{7}, x=0, \bar{7})}$, приведенных на рис. 3.1 и содержащих пиксели из трех диапазонов яркости $[0,9]$, $[10,19]$, $[20,29]$, выбрать пороговое значение Δ_G для условия $|p(y, x) - p(y + y', x + x')| \leq \Delta_G$ присоединения пикселей к области ($p(y, x)$ – текущий пиксель, $p(y + y', x + x')$ – смежный пиксель, $y' = \{-1, 0, 1\}$, $x' = \{-1, 0, 1\}$), порядок выборки смежных пикселей в окрестности текущего пикселя, порядок выборки новых пикселей роста на изображении, способ назначения начальных пикселей роста, тип стеков Y_F и X_F координат смежных пикселей (FIFO или LIFO) и порядок их работы; построить временные диаграммы работы стеков координат смежных пикселей (привести значения элементов стеков Y_F и X_F , значения указателя стека p_F для каждого обрабатываемого пикселя $p(y, x)$); сформировать матрицу сегментации $S = \|s(y, x)\|_{(y=0, 2^{3-l}-1, x=0, 2^{3-l}-1)}$ по алгоритму пиксельной сегментации изображений на основе древовидно-волнового выращивания областей (WRG), приведенному в подразд. 2.1. Изменяются ли значения матрицы сегментации и границы сегментов при изменении: а) порядка выборки смежных пикселей в окрестности текущего пикселя; б) порядка выборки новых пикселей роста на изображении; в) способа назначения начальных пикселей роста; г) типа стеков координат смежных пикселей и порядка их работы.

Пример решения задачи для изображения $P1$, приведенного на рис. 3.1, а:

1) Пусть: значение порога $\Delta_G = 5$; порядок выборки смежных пикселей в окрестности текущего пикселя происходит по часовой стрелке относительно

правого верхнего угла области смежных пикселей; порядок выборки новых пикселей роста на изображении происходит слева направо, сверху вниз; начальные пиксели роста имеют следующие координаты: (0,3); (1,1); (1,6); (3,2); (3,5); (6,0); (6,7) (матрицы координат начальных пикселей роста: $BM_Y = \{0,1,1,3,3,6,6\}$, $BM_X = \{3,1,6,2,5,0,7\}$). Тип стеков Y_F и X_F – LIFO; стеки Y_F и X_F заполняются слева направо; нумерация элементов стека начинается с нуля; первый (выгружаемый) элемент стека расположен в стеке справа в позиции $p_F - 1$; при выгрузке очередного элемента стек не сдвигается; указатель стека p_F указывает на число элементов в стеке; после записи в стек указатель увеличивается; перед выгрузкой из стека указатель уменьшается; последний загруженный в стек элемент расположен справа в позиции $p_F - 1$.

2) Инициализация (рис. 3.16).

Матрица сегментации S : $s(y, x) \leftarrow 0$ при $y = \overline{0, Y-1}$, $x = \overline{0, X-1}$.

Стеки роста областей $\{GM_Y(k)\}_{(p=0, K_{BM}-1)}$, $\{GM_X(k)\}_{(p=0, K_{BM}-1)}$:

$$\begin{aligned}
 gm_Y(0,0) \leftarrow bm_Y(0), gm_X(0,0) \leftarrow bm_X(0) &\Rightarrow gm_Y(0,0)=0, gm_X(0,0)=3; \\
 gm_Y(1,0) \leftarrow bm_Y(1), gm_X(1,0) \leftarrow bm_X(1) &\Rightarrow gm_Y(1,0)=1, gm_X(1,0)=1; \\
 gm_Y(2,0) \leftarrow bm_Y(2), gm_X(2,0) \leftarrow bm_X(2) &\Rightarrow gm_Y(2,0)=1, gm_X(2,0)=6; \\
 gm_Y(3,0) \leftarrow bm_Y(3), gm_X(3,0) \leftarrow bm_X(3) &\Rightarrow gm_Y(3,0)=3, gm_X(3,0)=2; \\
 gm_Y(4,0) \leftarrow bm_Y(4), gm_X(4,0) \leftarrow bm_X(4) &\Rightarrow gm_Y(4,0)=3, gm_X(4,0)=5; \\
 gm_Y(5,0) \leftarrow bm_Y(5), gm_X(5,0) \leftarrow bm_X(5) &\Rightarrow gm_Y(5,0)=6, gm_X(5,0)=0; \\
 gm_Y(6,0) \leftarrow bm_Y(6), gm_X(6,0) \leftarrow bm_X(6) &\Rightarrow gm_Y(6,0)=6, gm_X(6,0)=7.
 \end{aligned}$$

Указатели стеков: $p(k) \leftarrow 1$ при $k = \overline{0, 7}$.

Начальные пиксели роста:

$$s(0,3) \leftarrow 1, s(1,1) \leftarrow 2, s(1,6) \leftarrow 3, s(3,2) \leftarrow 4, s(3,5) \leftarrow 5, s(6,0) \leftarrow 6, s(6,7) \leftarrow 7.$$

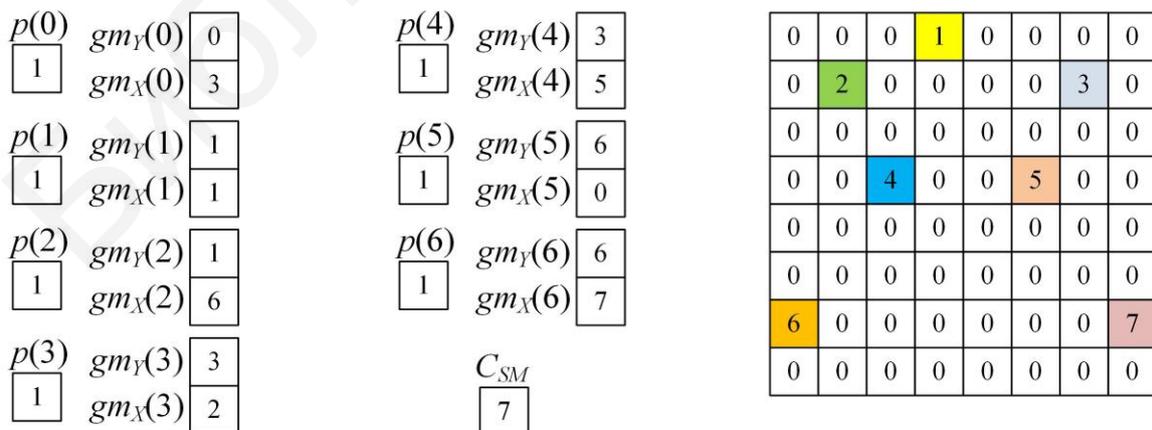


Рис. 3.16. Состояния переменных алгоритма WRG при инициализации

3) Цикл 1.

Выращивание области 1 (рис. 3.17):

$$\begin{aligned}
& p(0) \leftarrow p(0) - 1, y_B \leftarrow gm_Y(0,0), x_B \leftarrow gm_X(0,0) \Rightarrow y_B=0, x_B=3; \\
& s(0,4)=0 \text{ и } |p(0,3) - p(0,4)| \leq 5 \Rightarrow s(0,4) \leftarrow s(0,3), gm_Y(0,0) \leftarrow 0, \\
& gm_X(0,0) \leftarrow 4, p(0) \leftarrow p(0) + 1; \\
& s(1,3)=0 \text{ и } |p(0,3) - p(1,3)| \leq 5 \Rightarrow s(1,3) \leftarrow s(0,3), gm_Y(0,1) \leftarrow 1, \\
& gm_X(0,1) \leftarrow 3, p(0) \leftarrow p(0) + 1; \\
& s(1,2)=0 \text{ и } |p(0,3) - p(1,2)| \leq 5 \Rightarrow s(1,2) \leftarrow s(0,3), gm_Y(0,2) \leftarrow 1, \\
& gm_X(0,2) \leftarrow 2, p(0) \leftarrow p(0) + 1; \\
& s(0,2)=0 \text{ и } |p(0,3) - p(0,2)| \leq 5 \Rightarrow s(0,2) \leftarrow s(0,3), gm_Y(0,3) \leftarrow 0 \\
& gm_X(0,3) \leftarrow 2, p(0) \leftarrow p(0) + 1.
\end{aligned}$$

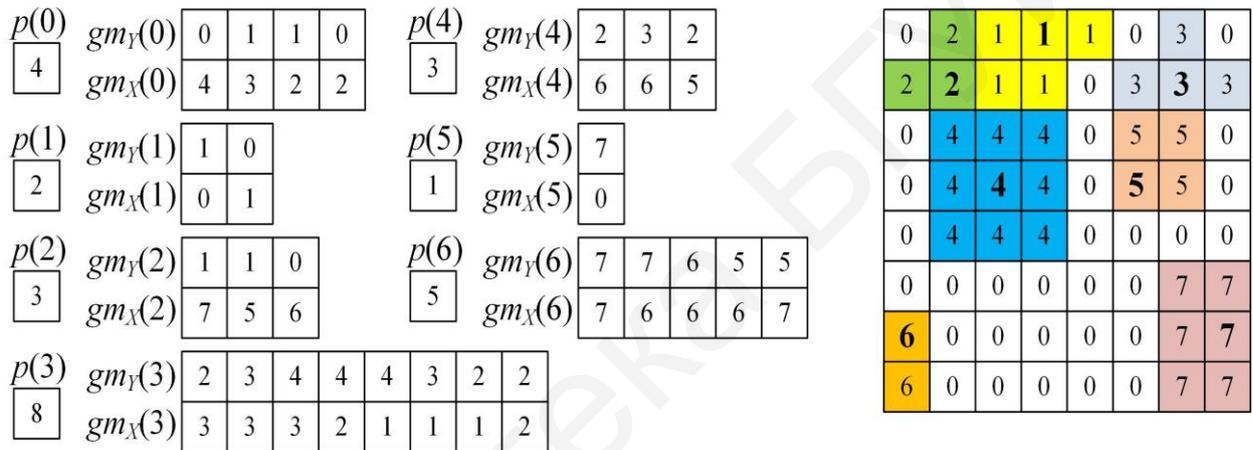


Рис. 3.17. Выращивание областей с помощью алгоритма WRG: цикл 1

Выращивание области 2 (см. рис. 3.17):

$$\begin{aligned}
& p(1) \leftarrow p(1) - 1, y_B \leftarrow gm_Y(1,0), x_B \leftarrow gm_X(1,0) \Rightarrow y_B=1, x_B=1; \\
& s(1,0)=0 \text{ и } |p(1,1) - p(1,0)| \leq 5 \Rightarrow s(1,0) \leftarrow s(1,1), gm_Y(1,0) \leftarrow 1, gm_X(1,0) \leftarrow 0, \\
& p(1) \leftarrow p(1) + 1; \\
& s(0,1)=0 \text{ и } |p(1,1) - p(0,1)| \leq 5 \Rightarrow s(0,1) \leftarrow s(1,1), gm_Y(1,1) \leftarrow 0, gm_X(1,1) \leftarrow 1, \\
& p(1) \leftarrow p(1) + 1.
\end{aligned}$$

Выращивание области 3 (см. рис. 3.17):

$$\begin{aligned}
& p(2) \leftarrow p(2) - 1, y_B \leftarrow gm_Y(2,0), x_B \leftarrow gm_X(2,0) \Rightarrow y_B=1, x_B=6; \\
& s(1,7)=0 \text{ и } |p(1,7) - p(1,6)| \leq 5 \Rightarrow s(1,7) \leftarrow s(1,6), gm_Y(2,0) \leftarrow 1, \\
& gm_X(2,0) \leftarrow 7, p(2) \leftarrow p(2) + 1; \\
& s(1,5)=0 \text{ и } |p(1,5) - p(1,6)| \leq 5 \Rightarrow s(1,5) \leftarrow s(1,6), gm_Y(2,1) \leftarrow 1, \\
& gm_X(2,1) \leftarrow 5, p(2) \leftarrow p(2) + 1;
\end{aligned}$$

$$s(0,6)=0 \quad \text{и} \quad |p(0,6) - p(1,6)| \leq 5 \quad \Rightarrow \quad s(0,6) \leftarrow s(1,6), \quad gm_Y(2,2) \leftarrow 0, \\ gm_X(2,2) \leftarrow 6, \quad p(2) \leftarrow p(2) + 1.$$

Выращивание области 4 (см. рис. 3.17):

$$p(3) \leftarrow p(3) - 1, \quad y_B \leftarrow gm_Y(3,0), \quad x_B \leftarrow gm_X(3,0) \Rightarrow y_B=3, \quad x_B=2;$$

$$s(2,3)=0 \quad \text{и} \quad |p(2,3) - p(3,2)| \leq 5 \quad \Rightarrow \quad s(2,3) \leftarrow s(3,2), \quad gm_Y(3,0) \leftarrow 2, \\ gm_X(3,0) \leftarrow 3, \quad p(3) \leftarrow p(3) + 1;$$

$$s(3,3)=0 \quad \text{и} \quad |p(3,3) - p(3,2)| \leq 5 \quad \Rightarrow \quad s(3,3) \leftarrow s(3,2), \quad gm_Y(3,1) \leftarrow 3, \\ gm_X(3,1) \leftarrow 3, \quad p(3) \leftarrow p(3) + 1;$$

$$s(4,3)=0 \quad \text{и} \quad |p(4,3) - p(3,2)| \leq 5 \quad \Rightarrow \quad s(4,3) \leftarrow s(3,2), \quad gm_Y(3,2) \leftarrow 4, \\ gm_X(3,2) \leftarrow 3, \quad p(3) \leftarrow p(3) + 1;$$

$$s(4,2)=0 \quad \text{и} \quad |p(4,2) - p(3,2)| \leq 5 \quad \Rightarrow \quad s(4,2) \leftarrow s(3,2), \quad gm_Y(3,3) \leftarrow 4, \\ gm_X(3,3) \leftarrow 2, \quad p(3) \leftarrow p(3) + 1;$$

$$s(4,1)=0 \quad \text{и} \quad |p(4,1) - p(3,2)| \leq 5 \quad \Rightarrow \quad s(4,1) \leftarrow s(3,2), \quad gm_Y(3,4) \leftarrow 4, \\ gm_X(3,4) \leftarrow 1, \quad p(3) \leftarrow p(3) + 1;$$

$$s(3,1)=0 \quad \text{и} \quad |p(3,1) - p(3,2)| \leq 5 \quad \Rightarrow \quad s(3,1) \leftarrow s(3,2), \quad gm_Y(3,5) \leftarrow 3, \\ gm_X(3,5) \leftarrow 1, \quad p(3) \leftarrow p(3) + 1;$$

$$s(2,1)=0 \quad \text{и} \quad |p(2,1) - p(3,2)| \leq 5 \quad \Rightarrow \quad s(2,1) \leftarrow s(3,2), \quad gm_Y(3,6) \leftarrow 2, \\ gm_X(3,6) \leftarrow 1, \quad p(3) \leftarrow p(3) + 1;$$

$$s(2,2)=0 \quad \text{и} \quad |p(2,2) - p(3,2)| \leq 5 \quad \Rightarrow \quad s(2,2) \leftarrow s(3,2), \quad gm_Y(3,7) \leftarrow 2, \\ gm_X(3,7) \leftarrow 2, \quad p(3) \leftarrow p(3) + 1.$$

Выращивание области 5 (см. рис. 3.17):

$$p(4) \leftarrow p(4) - 1, \quad y_B \leftarrow gm_Y(4,0), \quad x_B \leftarrow gm_X(4,0) \Rightarrow y_B=3, \quad x_B=5;$$

$$s(2,6)=0 \quad \text{и} \quad |p(2,6) - p(3,5)| \leq 5 \quad \Rightarrow \quad s(2,6) \leftarrow s(3,5), \quad gm_Y(4,0) \leftarrow 2, \\ gm_X(4,0) \leftarrow 6, \quad p(4) \leftarrow p(4) + 1;$$

$$s(3,6)=0 \quad \text{и} \quad |p(3,6) - p(3,5)| \leq 5 \quad \Rightarrow \quad s(3,6) \leftarrow s(3,5), \quad gm_Y(4,1) \leftarrow 3, \\ gm_X(4,1) \leftarrow 6, \quad p(4) \leftarrow p(4) + 1;$$

$$s(2,5)=0 \quad \text{и} \quad |p(2,5) - p(3,5)| \leq 5 \quad \Rightarrow \quad s(2,5) \leftarrow s(3,5), \quad gm_Y(4,2) \leftarrow 2, \\ gm_X(4,2) \leftarrow 5, \quad p(4) \leftarrow p(4) + 1.$$

Выращивание области 6 (см. рис. 3.17):

$$p(5) \leftarrow p(5) - 1, \quad y_B \leftarrow gm_Y(5,0), \quad x_B \leftarrow gm_X(5,0) \Rightarrow y_B=6, \quad x_B=0;$$

$$s(7,0)=0 \quad \text{и} \quad |p(7,0) - p(6,0)| \leq 5 \quad \Rightarrow \quad s(7,0) \leftarrow s(6,0), \quad gm_Y(5,0) \leftarrow 7, \\ gm_X(5,0) \leftarrow 0, \quad p(5) \leftarrow p(5) + 1.$$

Выращивание области 7 (см. рис. 3.17):

$$\begin{aligned}
& p(6) \leftarrow p(6) - 1, y_B \leftarrow gm_Y(6,0), x_B \leftarrow gm_X(6,0) \Rightarrow y_B=6, x_B=7; \\
& s(7,7)=0 \text{ и } |p(7,7) - p(6,7)| \leq 5 \Rightarrow s(7,7) \leftarrow s(6,7), gm_Y(6,0) \leftarrow 7, \\
& gm_X(6,0) \leftarrow 7, p(6) \leftarrow p(6) + 1; \\
& s(7,6)=0 \text{ и } |p(7,6) - p(6,7)| \leq 5 \Rightarrow s(7,6) \leftarrow s(6,7), gm_Y(6,1) \leftarrow 7, \\
& gm_X(6,1) \leftarrow 0, p(6) \leftarrow p(6) + 1; \\
& s(6,6)=0 \text{ и } |p(6,6) - p(6,7)| \leq 5 \Rightarrow s(6,6) \leftarrow s(6,7), gm_Y(6,2) \leftarrow 6, \\
& gm_X(6,2) \leftarrow 6, p(6) \leftarrow p(6) + 1; \\
& s(5,6)=0 \text{ и } |p(5,6) - p(6,7)| \leq 5 \Rightarrow s(5,6) \leftarrow s(6,7), gm_Y(6,3) \leftarrow 5, \\
& gm_X(6,3) \leftarrow 6, p(6) \leftarrow p(6) + 1; \\
& s(5,7)=0 \text{ и } |p(5,7) - p(6,7)| \leq 5 \Rightarrow s(5,7) \leftarrow s(6,7), gm_Y(6,4) \leftarrow 5, \\
& gm_X(6,4) \leftarrow 7, p(6) \leftarrow p(6) + 1.
\end{aligned}$$

$$\sum_{k=0}^7 p(k) \neq 0 \Rightarrow \text{сегментация не завершена.}$$

4) Цикл 2.

Выращивание области 1 (рис. 3.18):

$$p(0) \leftarrow p(0) - 1, y_B \leftarrow gm_Y(0,3), x_B \leftarrow gm_X(0,3) \Rightarrow y_B=0, x_B=2.$$

Выращивание области 2 (см. рис. 3.18):

$$p(1) \leftarrow p(1) - 1, y_B \leftarrow gm_Y(1,1), x_B \leftarrow gm_X(1,1) \Rightarrow y_B=0, x_B=1.$$

Выращивание области 3 (см. рис. 3.18):

$$p(2) \leftarrow p(2) - 1, y_B \leftarrow gm_Y(2,2), x_B \leftarrow gm_X(2,2) \Rightarrow y_B=0, x_B=6.$$

Выращивание области 4 (см. рис. 3.18):

$$p(3) \leftarrow p(3) - 1, y_B \leftarrow gm_Y(3,7), x_B \leftarrow gm_X(3,7) \Rightarrow y_B=2, x_B=2.$$

Выращивание области 5 (см. рис. 3.18):

$$p(4) \leftarrow p(4) - 1, y_B \leftarrow gm_Y(4,2), x_B \leftarrow gm_X(4,2) \Rightarrow y_B=2, x_B=5.$$

Выращивание области 6 (см. рис. 3.18):

$$p(5) \leftarrow p(5) - 1, y_B \leftarrow gm_Y(5,0), x_B \leftarrow gm_X(5,0) \Rightarrow y_B=7, x_B=0.$$

Выращивание области 7 (см. рис. 3.18):

$$p(6) \leftarrow p(6) - 1, y_B \leftarrow gm_Y(6,4), x_B \leftarrow gm_X(6,4) \Rightarrow y_B=5, x_B=7;$$

$$\begin{aligned}
& s(4,6)=0 \text{ и } |p(4,6) - p(5,7)| \leq 5 \Rightarrow s(4,6) \leftarrow s(5,7), gm_Y(6,4) \leftarrow 4, \\
& gm_X(6,4) \leftarrow 6, p(6) \leftarrow p(6) + 1;
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& s(4,7)=0 \text{ и } |p(4,7) - p(5,7)| \leq 5 \Rightarrow s(4,7) \leftarrow s(5,7), gm_Y(6,5) \leftarrow 4, \\
& gm_X(6,5) \leftarrow 7, p(6) \leftarrow p(6) + 1.
\end{aligned}$$

$$\sum_{k=0}^7 p(k) \neq 0 \Rightarrow \text{сегментация не завершена.}$$

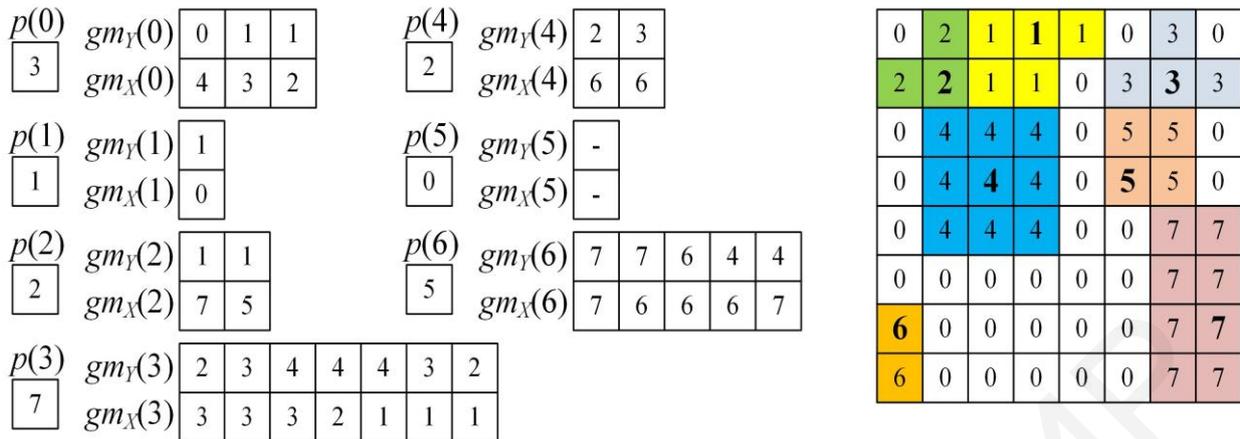


Рис. 3.18. Выращивание областей с помощью алгоритма WRG: цикл 2

5) Цикл 3.

Выращивание области 1 (рис. 3.19):

$$p(0) \leftarrow p(0) - 1, y_B \leftarrow gm_Y(0, 2), x_B \leftarrow gm_X(0, 2) \Rightarrow y_B = 1, x_B = 2.$$

Выращивание области 2 (см. рис. 3.19):

$$p(1) \leftarrow p(1) - 1, y_B \leftarrow gm_Y(1, 0), x_B \leftarrow gm_X(1, 0) \Rightarrow y_B = 1, x_B = 0;$$

$$s(0, 0) = 0 \text{ и } |p(0, 0) - p(1, 0)| \leq 5 \Rightarrow s(0, 0) \leftarrow s(1, 0), gm_Y(1, 0) \leftarrow 0, gm_X(1, 0) \leftarrow 0, p(1) \leftarrow p(1) + 1.$$

Выращивание области 3 (см. рис. 3.19):

$$p(2) \leftarrow p(2) - 1, y_B \leftarrow gm_Y(2, 1), x_B \leftarrow gm_X(2, 1) \Rightarrow y_B = 1, x_B = 5.$$

Выращивание области 4 (см. рис. 3.19):

$$p(3) \leftarrow p(3) - 1, y_B \leftarrow gm_Y(3, 6), x_B \leftarrow gm_X(3, 6) \Rightarrow y_B = 2, x_B = 1;$$

$$s(3, 0) = 0 \text{ и } |p(3, 0) - p(2, 1)| \leq 5 \Rightarrow s(3, 0) \leftarrow s(2, 1), gm_Y(3, 6) \leftarrow 3, gm_X(3, 6) \leftarrow 0, p(3) \leftarrow p(3) + 1;$$

$$s(2, 0) = 0 \text{ и } |p(2, 0) - p(2, 1)| \leq 5 \Rightarrow s(2, 0) \leftarrow s(2, 1), gm_Y(3, 7) \leftarrow 2, gm_X(3, 7) \leftarrow 0, p(3) \leftarrow p(3) + 1.$$

Выращивание области 5 (см. рис. 3.19):

$$p(4) \leftarrow p(4) - 1, y_B \leftarrow gm_Y(4, 1), x_B \leftarrow gm_X(4, 1) \Rightarrow y_B = 3, x_B = 6;$$

$$s(4, 5) = 0 \text{ и } |p(4, 5) - p(3, 6)| \leq 5 \Rightarrow s(4, 5) \leftarrow s(3, 6), gm_Y(4, 1) \leftarrow 4, gm_X(4, 1) \leftarrow 5, p(4) \leftarrow p(4) + 1.$$

Выращивание области 6 (см. рис. 3.19): $p(5) = 0 \Rightarrow$ область сегментирована.

Выращивание области 7 (см. рис. 3.19):

$$p(6) \leftarrow p(6) - 1, y_B \leftarrow gm_Y(6, 4), x_B \leftarrow gm_X(6, 4) \Rightarrow y_B = 4, x_B = 7.$$

$$\sum_{k=0}^7 p(k) \neq 0 \Rightarrow \text{сегментация не завершена.}$$

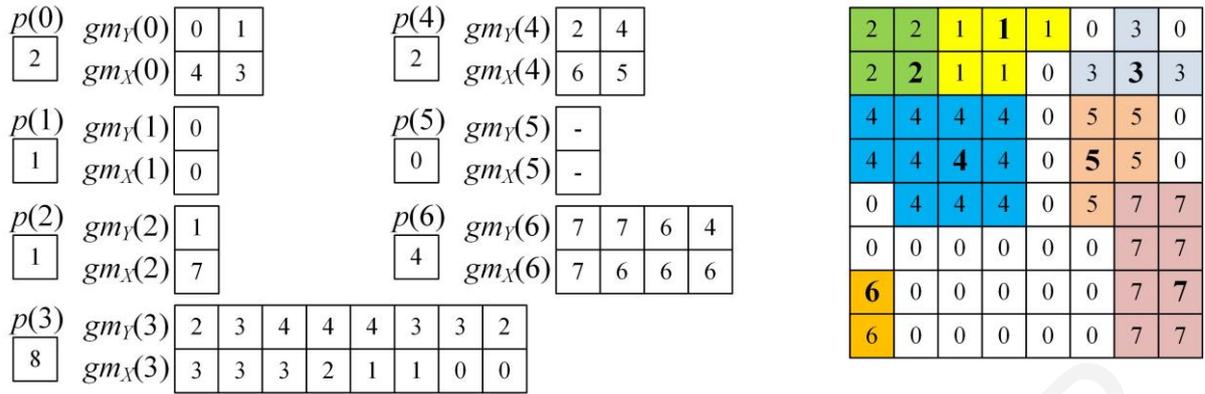


Рис. 3.19. Выращивание областей с помощью алгоритма WRG: цикл 3

б) Цикл 4.

Выращивание области 1 (рис. 3.20):

$$p(0) \leftarrow p(0) - 1, y_B \leftarrow gm_Y(0,1), x_B \leftarrow gm_X(0,1) \Rightarrow y_B=1, x_B=3.$$

Выращивание области 2 (см. рис. 3.20):

$$p(1) \leftarrow p(1) - 1, y_B \leftarrow gm_Y(1,0), x_B \leftarrow gm_X(1,0) \Rightarrow y_B=0, x_B=0.$$

Выращивание области 3 (см. рис. 3.20):

$$p(2) \leftarrow p(2) - 1, y_B \leftarrow gm_Y(2,0), x_B \leftarrow gm_X(2,0) \Rightarrow y_B=1, x_B=7.$$

Выращивание области 4 (см. рис. 3.20):

$$p(3) \leftarrow p(3) - 1, y_B \leftarrow gm_Y(3,7), x_B \leftarrow gm_X(3,7) \Rightarrow y_B=2, x_B=0.$$

Выращивание области 5 (см. рис. 3.20):

$$p(4) \leftarrow p(4) - 1, y_B \leftarrow gm_Y(4,1), x_B \leftarrow gm_X(4,1) \Rightarrow y_B=4, x_B=5;$$

$$s(5,5)=0 \quad \text{и} \quad |p(5,5) - p(4,5)| \leq 5 \Rightarrow s(5,5) \leftarrow s(4,5), \quad gm_Y(4,1) \leftarrow 5, \\ gm_X(4,1) \leftarrow 5, \quad p(4) \leftarrow p(4) + 1.$$

Выращивание области 6 (см. рис. 3.20): $p(5) = 0 \Rightarrow$ область сегментирована.

Выращивание области 7 (см. рис. 3.20):

$$p(6) \leftarrow p(6) - 1, y_B \leftarrow gm_Y(6,3), x_B \leftarrow gm_X(6,3) \Rightarrow y_B=4, x_B=6.$$

$$\sum_{k=0}^7 p(k) \neq 0 \Rightarrow \text{сегментация не завершена.}$$

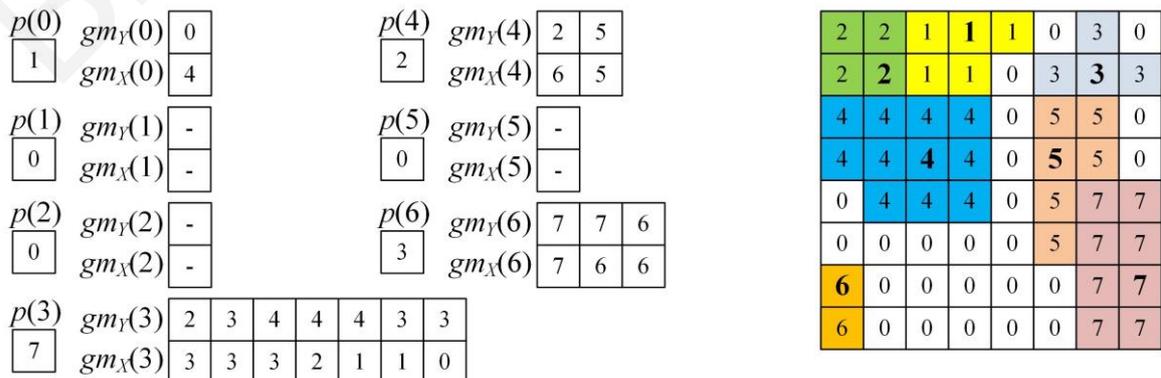


Рис. 3.20. Выращивание областей с помощью алгоритма WRG: цикл 4

7) Цикл 5.

Выращивание области 1 (рис. 3.21):

$$p(0) \leftarrow p(0) - 1, y_B \leftarrow gm_Y(0,0), x_B \leftarrow gm_X(0,0) \Rightarrow y_B=0, x_B=4;$$

$$s(0,5)=0 \text{ и } |p(0,5) - p(0,4)| \leq 5 \Rightarrow s(0,5) \leftarrow s(0,4), gm_Y(0,0) \leftarrow 0, gm_X(0,0) \leftarrow 5, p(0) \leftarrow p(0) + 1.$$

Выращивание области 2 (см. рис. 3.21): $p(1) = 0 \Rightarrow$ область сегментирована.

Выращивание области 3 (см. рис. 3.21): $p(2) = 0 \Rightarrow$ область сегментирована.

Выращивание области 4 (см. рис. 3.21):

$$p(3) \leftarrow p(3) - 1, y_B \leftarrow gm_Y(3,6), x_B \leftarrow gm_X(3,6) \Rightarrow y_B=3, x_B=0;$$

$$s(4,0)=0 \text{ и } |p(4,0) - p(3,0)| \leq 5 \Rightarrow s(4,0) \leftarrow s(3,0), gm_Y(3,6) \leftarrow 4, gm_X(3,6) \leftarrow 0, p(3) \leftarrow p(3) + 1.$$

Выращивание области 5 (см. рис. 3.21):

$$p(4) \leftarrow p(4) - 1, y_B \leftarrow gm_Y(4,1), x_B \leftarrow gm_X(4,1) \Rightarrow y_B=5, x_B=5;$$

$$s(6,5)=0 \text{ и } |p(6,5) - p(5,5)| \leq 5 \Rightarrow s(6,5) \leftarrow s(5,5), gm_Y(4,1) \leftarrow 6, gm_X(4,1) \leftarrow 5, p(4) \leftarrow p(4) + 1.$$

Выращивание области 6 (см. рис. 3.21): $p(5) = 0 \Rightarrow$ область сегментирована.

Выращивание области 7 (см. рис. 3.21):

$$p(6) \leftarrow p(6) - 1, y_B \leftarrow gm_Y(6,2), x_B \leftarrow gm_X(6,2) \Rightarrow y_B=6, x_B=6.$$

$$\sum_{k=0}^7 p(k) \neq 0 \Rightarrow \text{сегментация не завершена.}$$

$p(0)$	$gm_Y(0)$	0
1	$gm_X(0)$	5

$p(4)$	$gm_Y(4)$	2	6
2	$gm_X(4)$	6	5

$p(1)$	$gm_Y(1)$	-
0	$gm_X(1)$	-

$p(5)$	$gm_Y(5)$	-
0	$gm_X(5)$	-

$p(2)$	$gm_Y(2)$	-
0	$gm_X(2)$	-

$p(6)$	$gm_Y(6)$	7	7
2	$gm_X(6)$	7	6

$p(3)$	$gm_Y(3)$	2	3	4	4	4	3	4
7	$gm_X(3)$	3	3	3	2	1	1	0

2	2	1	1	1	1	3	0
2	2	1	1	0	3	3	3
4	4	4	4	0	5	5	0
4	4	4	4	0	5	5	0
4	4	4	4	0	5	7	7
0	0	0	0	0	5	7	7
6	0	0	0	0	5	7	7
6	0	0	0	0	0	7	7

Рис. 3.21. Выращивание областей с помощью алгоритма WRG: цикл 5

8) Цикл 6.

Выращивание области 1 (рис. 3.22):

$$p(0) \leftarrow p(0) - 1, y_B \leftarrow gm_Y(0,0), x_B \leftarrow gm_X(0,0) \Rightarrow y_B=0, x_B=5.$$

Выращивание области 2 (см. рис. 3.22): $p(1) = 0 \Rightarrow$ область сегментирована.

Выращивание области 3 (см. рис. 3.22): $p(2) = 0 \Rightarrow$ область сегментирована.

Выращивание области 4 (см. рис. 3.22):

$$p(3) \leftarrow p(3) - 1, y_B \leftarrow gm_Y(3,6), x_B \leftarrow gm_X(3,6) \Rightarrow y_B=4, x_B=0;$$

$$s(5,1)=0 \text{ и } |p(4,0) - p(5,1)| \leq 5 \Rightarrow s(5,1) \leftarrow s(4,0), gm_Y(3,6) \leftarrow 5, gm_X(3,6) \leftarrow 1, p(3) \leftarrow p(3) + 1;$$

$$s(5,0)=0 \text{ и } |p(4,0) - p(5,0)| \leq 5 \Rightarrow s(5,0) \leftarrow s(4,0), gm_Y(3,7) \leftarrow 5, gm_X(3,7) \leftarrow 0, p(3) \leftarrow p(3) + 1.$$

Выращивание области 5 (см. рис. 3.22):

$$p(4) \leftarrow p(4) - 1, y_B \leftarrow gm_Y(4,1), x_B \leftarrow gm_X(4,1) \Rightarrow y_B=6, x_B=5;$$

$$s(7,5)=0 \text{ и } |p(6,5) - p(7,5)| \leq 5 \Rightarrow s(7,5) \leftarrow s(6,5), gm_Y(4,1) \leftarrow 7, gm_X(4,1) \leftarrow 5, p(4) \leftarrow p(4) + 1;$$

$$s(7,4)=0 \text{ и } |p(6,5) - p(7,4)| \leq 5 \Rightarrow s(7,4) \leftarrow s(6,5), gm_Y(4,2) \leftarrow 7, gm_X(4,2) \leftarrow 4, p(4) \leftarrow p(4) + 1.$$

Выращивание области 6 (см. рис. 3.22): $p(5) = 0 \Rightarrow$ область сегментирована.

Выращивание области 7 (см. рис. 3.22):

$$p(6) \leftarrow p(6) - 1, y_B \leftarrow gm_Y(6,1), x_B \leftarrow gm_X(6,1) \Rightarrow y_B=7, x_B=6.$$

$$\sum_{k=0}^7 p(k) \neq 0 \Rightarrow \text{сегментация не завершена.}$$

$p(0)$	$gm_Y(0)$	-
0	$gm_X(0)$	-

$p(4)$	$gm_Y(4)$	2	7	7
3	$gm_X(4)$	6	5	4

$p(1)$	$gm_Y(1)$	-
0	$gm_X(1)$	-

$p(5)$	$gm_Y(5)$	-
0	$gm_X(5)$	-

$p(2)$	$gm_Y(2)$	-
0	$gm_X(2)$	-

$p(6)$	$gm_Y(6)$	7
1	$gm_X(6)$	7

$p(3)$	$gm_Y(3)$	2	3	4	4	4	3	5	5
8	$gm_X(3)$	3	3	3	2	1	1	1	0

2	2	1	1	1	1	3	0
2	2	1	1	0	3	3	3
4	4	4	4	0	5	5	0
4	4	4	4	0	5	5	0
4	4	4	4	0	5	7	7
4	4	0	0	0	5	7	7
6	0	0	0	0	5	7	7
6	0	0	0	5	5	7	7

Рис. 3.22. Выращивание областей с помощью алгоритма WRG: цикл 6

9) Цикл 7.

Выращивание области 1 (рис. 3.23): $p(0) = 0 \Rightarrow$ область сегментирована.

Выращивание области 2 (см. рис. 3.23): $p(1) = 0 \Rightarrow$ область сегментирована.

Выращивание области 3 (см. рис. 3.23): $p(2) = 0 \Rightarrow$ область сегментирована.

Выращивание области 4 (см. рис. 3.23):

$$p(3) \leftarrow p(3) - 1, y_B \leftarrow gm_Y(3,7), x_B \leftarrow gm_X(3,7) \Rightarrow y_B=5, x_B=0.$$

Выращивание области 5 (см. рис. 3.23):

$p(4) \leftarrow p(4) - 1, y_B \leftarrow gm_Y(4,2), x_B \leftarrow gm_X(4,2) \Rightarrow y_B=7, x_B=4;$
 $s(7,3)=0$ и $|p(7,3) - p(7,4)| \leq 5 \Rightarrow s(7,3) \leftarrow s(7,4), gm_Y(4,2) \leftarrow 7,$
 $gm_X(4,2) \leftarrow 3, p(4) \leftarrow p(4) + 1.$

Выращивание области 6 (см. рис. 3.23): $p(5) = 0 \Rightarrow$ область сегментирована.

Выращивание области 7 (см. рис. 3.23):

$p(6) \leftarrow p(6) - 1, y_B \leftarrow gm_Y(6,0), x_B \leftarrow gm_X(6,0) \Rightarrow y_B=7, x_B=7.$

$\sum_{k=0}^7 p(k) \neq 0 \Rightarrow$ сегментация не завершена.

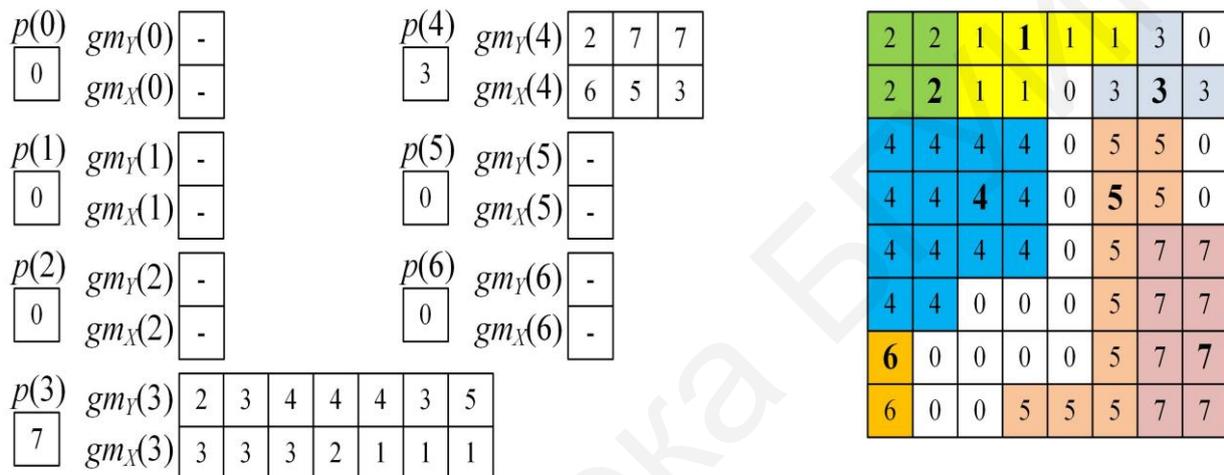


Рис. 3.23. Выращивание областей с помощью алгоритма WRG: цикл 7

10) Цикл 8.

Выращивание области 1 (рис. 3.24): $p(0) = 0 \Rightarrow$ область сегментирована.

Выращивание области 2 (см. рис. 3.24): $p(1) = 0 \Rightarrow$ область сегментирована.

Выращивание области 3 (см. рис. 3.24): $p(2) = 0 \Rightarrow$ область сегментирована.

Выращивание области 4 (см. рис. 3.24):

$p(3) \leftarrow p(3) - 1, y_B \leftarrow gm_Y(3,6), x_B \leftarrow gm_X(3,6) \Rightarrow y_B=5, x_B=1;$

$s(5,2)=0$ и $|p(5,2) - p(5,1)| \leq 5 \Rightarrow s(5,2) \leftarrow s(5,1), gm_Y(3,6) \leftarrow 5,$
 $gm_X(3,6) \leftarrow 2, p(3) \leftarrow p(3) + 1.$

Выращивание области 5 (см. рис. 3.24):

$p(4) \leftarrow p(4) - 1, y_B \leftarrow gm_Y(4,2), x_B \leftarrow gm_X(4,2) \Rightarrow y_B=7, x_B=3;$

$s(7,2)=0$ и $|p(7,3) - p(7,2)| \leq 5 \Rightarrow s(7,2) \leftarrow s(7,3), gm_Y(4,2) \leftarrow 7,$
 $gm_X(4,2) \leftarrow 2, p(4) \leftarrow p(4) + 1;$

$s(6,2)=0$ и $|p(7,3) - p(6,2)| \leq 5 \Rightarrow s(6,2) \leftarrow s(7,3), gm_Y(4,3) \leftarrow 6,$
 $gm_X(4,3) \leftarrow 2, p(4) \leftarrow p(4) + 1.$

Выращивание области 6 (см. рис. 3.24): $p(5) = 0 \Rightarrow$ область сегментирована.

Выращивание области 7 (см. рис. 3.24): $p(6) = 0 \Rightarrow$ область сегментирована.

$$\sum_{k=0}^7 p(k) \neq 0 \Rightarrow \text{сегментация не завершена.}$$

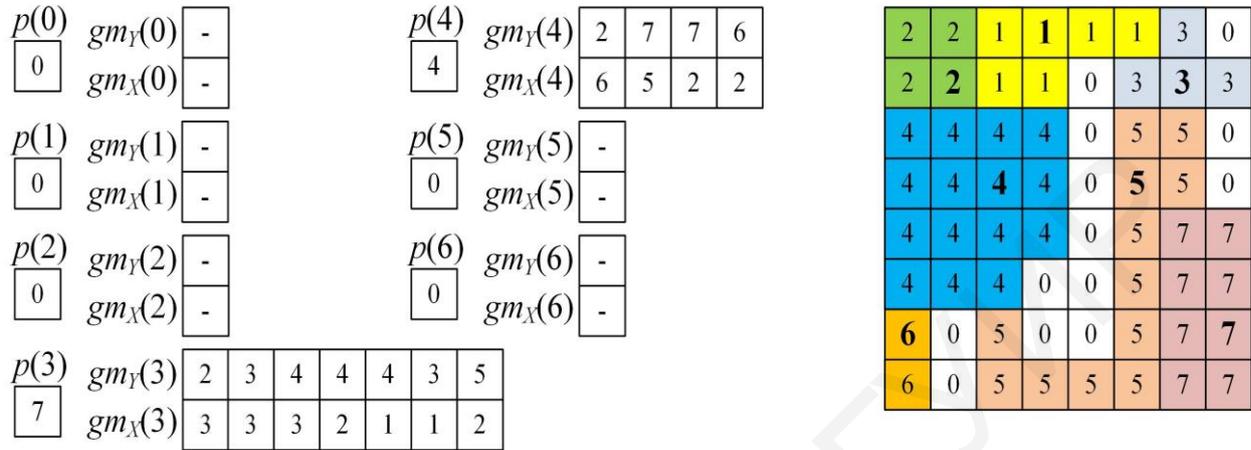


Рис. 3.24. Выращивание областей с помощью алгоритма WRG: цикл 8

11) Цикл 9.

Выращивание области 1 (рис. 3.25): $p(0) = 0 \Rightarrow$ область сегментирована.

Выращивание области 2 (см. рис. 3.25): $p(1) = 0 \Rightarrow$ область сегментирована.

Выращивание области 3 (см. рис. 3.25): $p(2) = 0 \Rightarrow$ область сегментирована.

Выращивание области 4 (см. рис. 3.25):

$$p(3) \leftarrow p(3) - 1, y_B \leftarrow gm_Y(3,6), x_B \leftarrow gm_X(3,6) \Rightarrow y_B = 5, x_B = 2;$$

$$s(5,3) = 0 \text{ и } |p(5,2) - p(5,3)| \leq 5 \Rightarrow s(5,3) \leftarrow s(5,2), gm_Y(3,6) \leftarrow 5, gm_X(3,6) \leftarrow 3, p(3) \leftarrow p(3) + 1.$$

Выращивание области 5 (см. рис. 3.25):

$$p(4) \leftarrow p(4) - 1, y_B \leftarrow gm_Y(4,3), x_B \leftarrow gm_X(4,3) \Rightarrow y_B = 6, x_B = 2;$$

$$s(6,3) = 0 \text{ и } |p(6,3) - p(6,2)| \leq 5 \Rightarrow s(6,3) \leftarrow s(6,2), gm_Y(4,3) \leftarrow 6, gm_X(4,3) \leftarrow 3, p(4) \leftarrow p(4) + 1;$$

$$s(7,1) = 0 \text{ и } |p(7,1) - p(6,2)| \leq 5 \Rightarrow s(7,1) \leftarrow s(6,2), gm_Y(4,4) \leftarrow 7, gm_X(4,4) \leftarrow 1, p(4) \leftarrow p(4) + 1;$$

$$s(6,1) = 0 \text{ и } |p(6,1) - p(6,2)| \leq 5 \Rightarrow s(6,1) \leftarrow s(6,2), gm_Y(4,5) \leftarrow 6, gm_X(4,5) \leftarrow 1, p(4) \leftarrow p(4) + 1.$$

Выращивание области 6 (см. рис. 3.25): $p(5) = 0 \Rightarrow$ область сегментирована.

Выращивание области 7 (см. рис. 3.25): $p(6) = 0 \Rightarrow$ область сегментирована.

$$\sum_{k=0}^7 p(k) \neq 0 \Rightarrow \text{сегментация не завершена.}$$

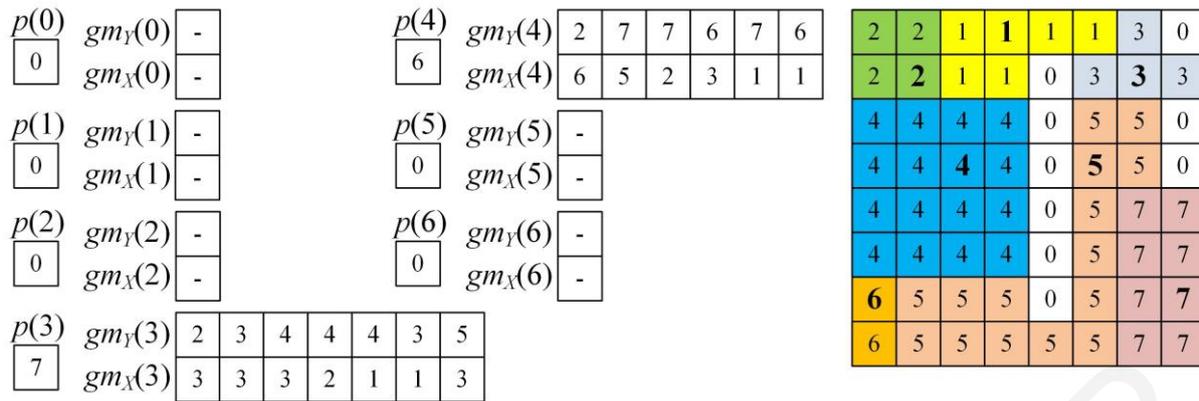


Рис. 3.25. Выращивание областей с помощью алгоритма WRG: цикл 9

12) Цикл 10.

Выращивание области 1 (рис. 3.26): $p(0) = 0 \Rightarrow$ область сегментирована.

Выращивание области 2 (см. рис. 3.26): $p(1) = 0 \Rightarrow$ область сегментирована.

Выращивание области 3 (см. рис. 3.26): $p(2) = 0 \Rightarrow$ область сегментирована.

Выращивание области 4 (см. рис. 3.26):

$$p(3) \leftarrow p(3) - 1, y_B \leftarrow gm_Y(3,6), x_B \leftarrow gm_X(3,6) \Rightarrow y_B = 5, x_B = 3.$$

Выращивание области 5 (см. рис. 3.26):

$$p(4) \leftarrow p(4) - 1, y_B \leftarrow gm_Y(4,5), x_B \leftarrow gm_X(4,5) \Rightarrow y_B = 6, x_B = 1.$$

Выращивание области 6 (см. рис. 3.26): $p(5) = 0 \Rightarrow$ область сегментирована.

Выращивание области 7 (см. рис. 3.26): $p(6) = 0 \Rightarrow$ область сегментирована.

$$\sum_{k=0}^7 p(k) \neq 0 \Rightarrow \text{сегментация не завершена.}$$

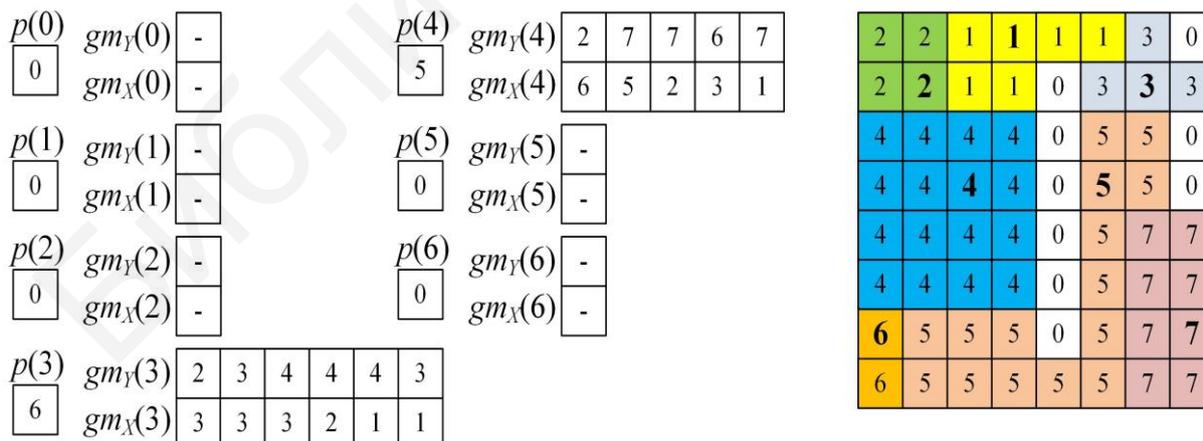


Рис. 3.26. Выращивание областей с помощью алгоритма WRG: цикл 10

13) Цикл 11.

Выращивание области 1 (рис. 3.27): $p(0) = 0 \Rightarrow$ область сегментирована.

Выращивание области 2 (см. рис. 3.27): $p(1) = 0 \Rightarrow$ область сегментирована.

Выращивание области 3 (см. рис. 3.27): $p(2) = 0 \Rightarrow$ область сегментирована.

Выращивание области 4 (см. рис. 3.27):

$$p(3) \leftarrow p(3) - 1, y_B \leftarrow gm_Y(3,5), x_B \leftarrow gm_X(3,5) \Rightarrow y_B = 3, x_B = 1.$$

Выращивание области 5 (см. рис. 3.27):

$$p(4) \leftarrow p(4) - 1, y_B \leftarrow gm_Y(4,4), x_B \leftarrow gm_X(4,4) \Rightarrow y_B = 7, x_B = 1.$$

Выращивание области 6 (см. рис. 3.27): $p(5) = 0 \Rightarrow$ область сегментирована.

Выращивание области 7 (см. рис. 3.27): $p(6) = 0 \Rightarrow$ область сегментирована.

$$\sum_{k=0}^7 p(k) \neq 0 \Rightarrow \text{сегментация не завершена.}$$

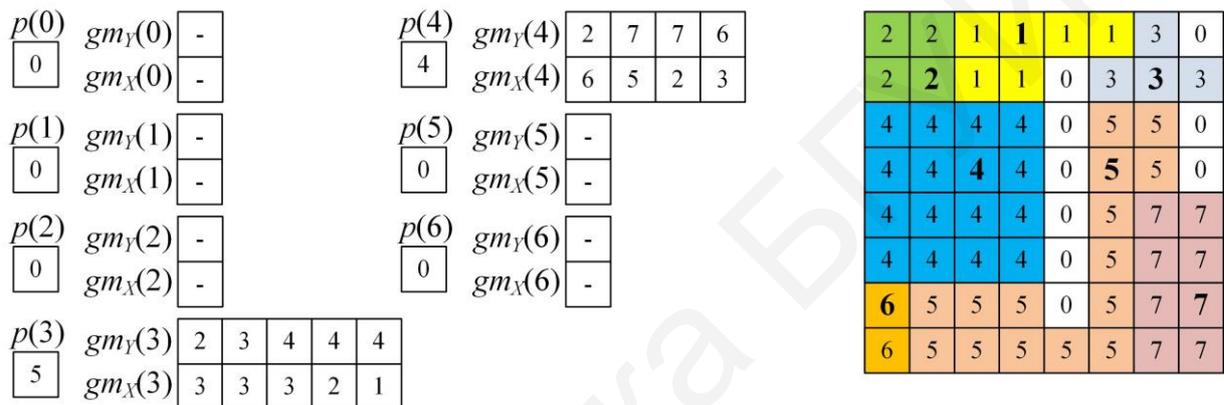


Рис. 3.27. Выращивание областей с помощью алгоритма WRG: цикл 11

14) Цикл 12.

Выращивание области 1 (рис. 3.28): $p(0) = 0 \Rightarrow$ область сегментирована.

Выращивание области 2 (см. рис. 3.28): $p(1) = 0 \Rightarrow$ область сегментирована.

Выращивание области 3 (см. рис. 3.28): $p(2) = 0 \Rightarrow$ область сегментирована.

Выращивание области 4 (см. рис. 3.28):

$$p(3) \leftarrow p(3) - 1, y_B \leftarrow gm_Y(3,4), x_B \leftarrow gm_X(3,4) \Rightarrow y_B = 4, x_B = 1.$$

Выращивание области 5 (см. рис. 3.28):

$$p(4) \leftarrow p(4) - 1, y_B \leftarrow gm_Y(4,3), x_B \leftarrow gm_X(4,3) \Rightarrow y_B = 6, x_B = 3;$$

$$s(5,4) = 0 \quad \text{и} \quad |p(6,3) - p(5,4)| \leq 5 \Rightarrow s(5,4) \leftarrow s(6,3), \quad gm_Y(4,3) \leftarrow 5, \\ gm_X(4,3) \leftarrow 4, \quad p(4) \leftarrow p(4) + 1;$$

$$s(6,4) = 0 \quad \text{и} \quad |p(6,3) - p(6,4)| \leq 5 \Rightarrow s(6,4) \leftarrow s(6,3), \quad gm_Y(4,4) \leftarrow 6, \\ gm_X(4,4) \leftarrow 4, \quad p(4) \leftarrow p(4) + 1.$$

Выращивание области 6 (см. рис. 3.28): $p(5) = 0 \Rightarrow$ область сегментирована.

Выращивание области 7 (см. рис. 3.28): $p(6) = 0 \Rightarrow$ область сегментирована.

$$\sum_{k=0}^7 p(k) \neq 0 \Rightarrow \text{сегментация не завершена.}$$

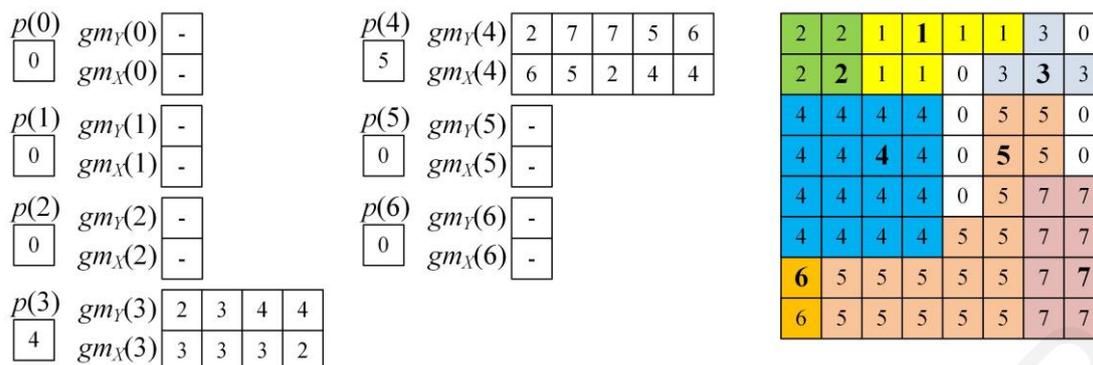


Рис. 3.28. Выращивание областей с помощью алгоритма WRG: цикл 12

15) Цикл 13.

Выращивание области 1 (рис. 3.29): $p(0) = 0 \Rightarrow$ область сегментирована.

Выращивание области 2 (см. рис. 3.29): $p(1) = 0 \Rightarrow$ область сегментирована.

Выращивание области 3 (см. рис. 3.29): $p(2) = 0 \Rightarrow$ область сегментирована.

Выращивание области 4 (см. рис. 3.29):

$$p(3) \leftarrow p(3) - 1, y_B \leftarrow gm_Y(3,3), x_B \leftarrow gm_X(3,3) \Rightarrow y_B = 4, x_B = 2.$$

Выращивание области 5 (см. рис. 3.29):

$$p(4) \leftarrow p(4) - 1, y_B \leftarrow gm_Y(4,4), x_B \leftarrow gm_X(4,4) \Rightarrow y_B = 6, x_B = 4.$$

Выращивание области 6 (см. рис. 3.29): $p(5) = 0 \Rightarrow$ область сегментирована.

Выращивание области 7 (см. рис. 3.29): $p(6) = 0 \Rightarrow$ область сегментирована.

$$\sum_{k=0}^7 p(k) \neq 0 \Rightarrow \text{сегментация не завершена.}$$

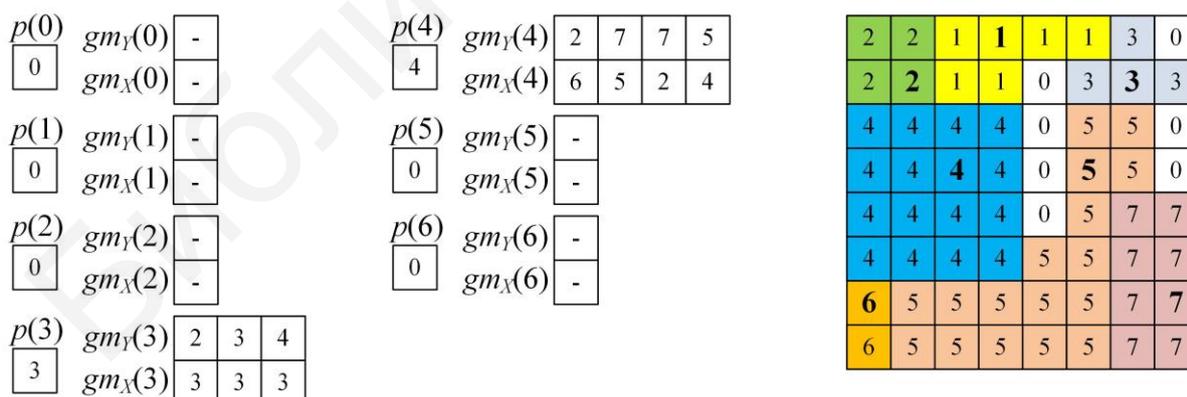


Рис. 3.29. Выращивание областей с помощью алгоритма WRG: цикл 13

16) Цикл 14.

Выращивание области 1 (рис. 3.30): $p(0) = 0 \Rightarrow$ область сегментирована.

Выращивание области 2 (см. рис. 3.30): $p(1) = 0 \Rightarrow$ область сегментирована.

Выращивание области 3 (см. рис. 3.30): $p(2) = 0 \Rightarrow$ область сегментирована.

Выращивание области 4 (см. рис. 3.30):

$$p(3) \leftarrow p(3) - 1, y_B \leftarrow gm_Y(3,2), x_B \leftarrow gm_X(3,2) \Rightarrow y_B=4, x_B=3;$$

$$s(3,4)=0 \quad \text{и} \quad |p(3,4) - p(4,3)| \leq 5 \Rightarrow s(3,4) \leftarrow s(4,3), \quad gm_Y(3,2) \leftarrow 3, \\ gm_X(3,2) \leftarrow 4, \quad p(3) \leftarrow p(3) + 1.$$

Выращивание области 5 (см. рис. 3.30):

$$p(4) \leftarrow p(4) - 1, y_B \leftarrow gm_Y(4,3), x_B \leftarrow gm_X(4,3) \Rightarrow y_B=5, x_B=4;$$

$$s(4,4)=0 \quad \text{и} \quad |p(4,4) - p(5,4)| \leq 5 \Rightarrow s(4,4) \leftarrow s(5,4), \quad gm_Y(4,3) \leftarrow 4, \\ gm_X(4,3) \leftarrow 4, \quad p(4) \leftarrow p(4) + 1.$$

Выращивание области 6 (см. рис. 3.30): $p(5) = 0 \Rightarrow$ область сегментирована.

Выращивание области 7 (см. рис. 3.30): $p(6) = 0 \Rightarrow$ область сегментирована.

$$\sum_{k=0}^7 p(k) \neq 0 \Rightarrow \text{сегментация не завершена.}$$

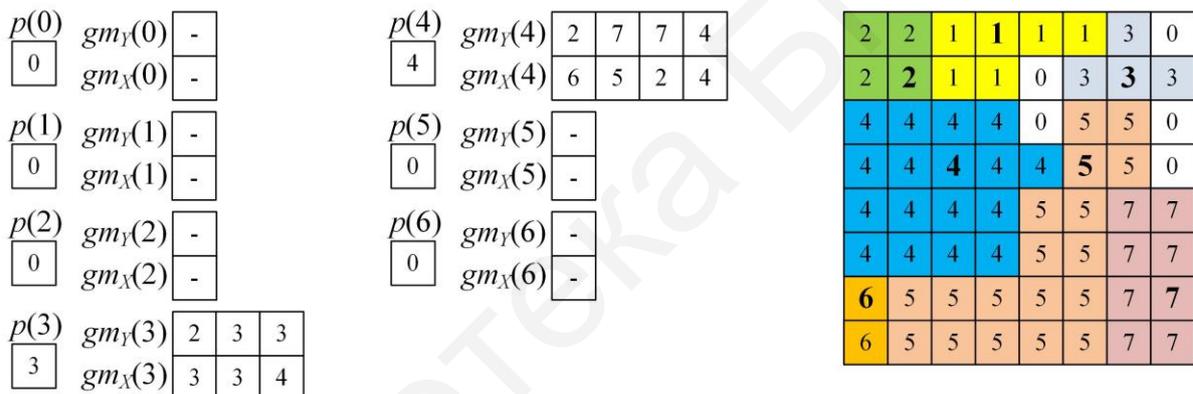


Рис. 3.30. Выращивание областей с помощью алгоритма WRG: цикл 14

17) Цикл 15.

Выращивание области 1 (рис. 3.31): $p(0) = 0 \Rightarrow$ область сегментирована.

Выращивание области 2 (см. рис. 3.31): $p(1) = 0 \Rightarrow$ область сегментирована.

Выращивание области 3 (см. рис. 3.31): $p(2) = 0 \Rightarrow$ область сегментирована.

Выращивание области 4 (см. рис. 3.31):

$$p(3) \leftarrow p(3) - 1, y_B \leftarrow gm_Y(3,2), x_B \leftarrow gm_X(3,2) \Rightarrow y_B=3, x_B=4.$$

Выращивание области 5 (см. рис. 3.31):

$$p(4) \leftarrow p(4) - 1, y_B \leftarrow gm_Y(4,3), x_B \leftarrow gm_X(4,3) \Rightarrow y_B=4, x_B=4.$$

Выращивание области 6 (см. рис. 3.31): $p(5) = 0 \Rightarrow$ область сегментирована.

Выращивание области 7 (см. рис. 3.31): $p(6) = 0 \Rightarrow$ область сегментирована.

$$\sum_{k=0}^7 p(k) \neq 0 \Rightarrow \text{сегментация не завершена.}$$

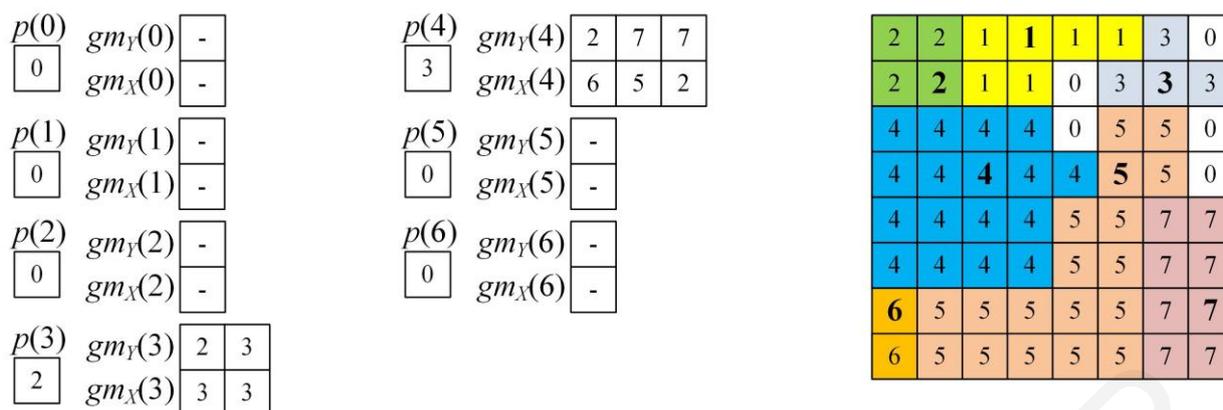


Рис. 3.31. Выращивание областей с помощью алгоритма WRG: цикл 15

18) Цикл 16.

Выращивание области 1 (рис. 3.32): $p(0) = 0 \Rightarrow$ область сегментирована.

Выращивание области 2 (см. рис. 3.32): $p(1) = 0 \Rightarrow$ область сегментирована.

Выращивание области 3 (см. рис. 3.32): $p(2) = 0 \Rightarrow$ область сегментирована.

Выращивание области 4 (см. рис. 3.32):

$$p(3) \leftarrow p(3) - 1, y_B \leftarrow gm_Y(3,1), x_B \leftarrow gm_X(3,1) \Rightarrow y_B = 3, x_B = 3.$$

Выращивание области 5 (см. рис. 3.32):

$$p(4) \leftarrow p(4) - 1, y_B \leftarrow gm_Y(4,2), x_B \leftarrow gm_X(4,2) \Rightarrow y_B = 7, x_B = 2.$$

Выращивание области 6 (см. рис. 3.32): $p(5) = 0 \Rightarrow$ область сегментирована.

Выращивание области 7 (см. рис. 3.32): $p(6) = 0 \Rightarrow$ область сегментирована.

$$\sum_{k=0}^7 p(k) \neq 0 \Rightarrow \text{сегментация не завершена.}$$

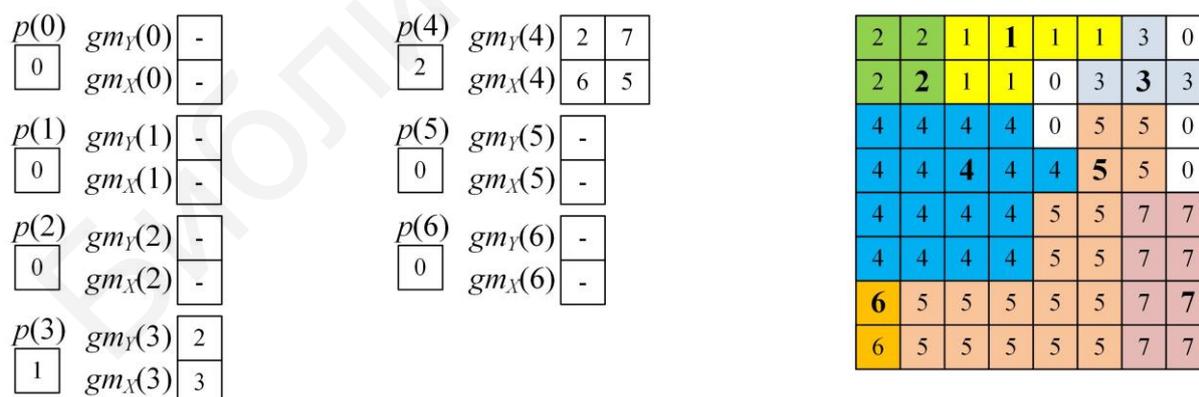


Рис. 3.32. Выращивание областей с помощью алгоритма WRG: цикл 16

19) Цикл 17.

Выращивание области 1 (рис. 3.33): $p(0) = 0 \Rightarrow$ область сегментирована.

Выращивание области 2 (см. рис. 3.33): $p(1) = 0 \Rightarrow$ область сегментирована.

Выращивание области 3 (см. рис. 3.33): $p(2) = 0 \Rightarrow$ область сегментирована.

Выращивание области 4 (см. рис. 3.33):

$$p(3) \leftarrow p(3) - 1, y_B \leftarrow gm_Y(3,0), x_B \leftarrow gm_X(3,0) \Rightarrow y_B=2, x_B=3;$$

$$s(1,4)=0 \quad \text{и} \quad |p(1,4) - p(2,3)| \leq 5 \quad \Rightarrow \quad s(1,4) \leftarrow s(2,3), \quad gm_Y(3,0) \leftarrow -1, \\ gm_X(3,0) \leftarrow -4, \quad p(3) \leftarrow p(3) + 1.$$

Выращивание области 5 (см. рис. 3.33):

$$p(4) \leftarrow p(4) - 1, y_B \leftarrow gm_Y(4,1), x_B \leftarrow gm_X(4,1) \Rightarrow y_B=7, x_B=5.$$

Выращивание области 6 (см. рис. 3.33): $p(5) = 0 \Rightarrow$ область сегментирована.

Выращивание области 7 (см. рис. 3.33): $p(6) = 0 \Rightarrow$ область сегментирована.

$$\sum_{k=0}^7 p(k) \neq 0 \Rightarrow \text{сегментация не завершена.}$$

$p(0)$	$gm_Y(0)$	-
0	$gm_X(0)$	-
$p(1)$	$gm_Y(1)$	-
0	$gm_X(1)$	-
$p(2)$	$gm_Y(2)$	-
0	$gm_X(2)$	-
$p(3)$	$gm_Y(3)$	1
1	$gm_X(3)$	4

$p(4)$	$gm_Y(4)$	2
1	$gm_X(4)$	6
$p(5)$	$gm_Y(5)$	-
0	$gm_X(5)$	-
$p(6)$	$gm_Y(6)$	-
0	$gm_X(6)$	-

2	2	1	1	1	1	3	0
2	2	1	1	4	3	3	3
4	4	4	4	0	5	5	0
4	4	4	4	4	5	5	0
4	4	4	4	5	5	7	7
4	4	4	4	5	5	7	7
6	5	5	5	5	5	7	7
6	5	5	5	5	5	7	7

Рис. 3.33. Выращивание областей с помощью алгоритма WRG: цикл 17

20) Цикл 18.

Выращивание области 1 (рис. 3.34): $p(0) = 0 \Rightarrow$ область сегментирована.

Выращивание области 2 (см. рис. 3.34): $p(1) = 0 \Rightarrow$ область сегментирована.

Выращивание области 3 (см. рис. 3.34): $p(2) = 0 \Rightarrow$ область сегментирована.

Выращивание области 4 (см. рис. 3.34):

$$p(3) \leftarrow p(3) - 1, y_B \leftarrow gm_Y(3,0), x_B \leftarrow gm_X(3,0) \Rightarrow y_B=1, x_B=4.$$

$p(0)$	$gm_Y(0)$	-
0	$gm_X(0)$	-
$p(1)$	$gm_Y(1)$	-
0	$gm_X(1)$	-
$p(2)$	$gm_Y(2)$	-
0	$gm_X(2)$	-
$p(3)$	$gm_Y(3)$	-
0	$gm_X(3)$	-

$p(4)$	$gm_Y(4)$	-
0	$gm_X(4)$	-
$p(5)$	$gm_Y(5)$	-
0	$gm_X(5)$	-
$p(6)$	$gm_Y(6)$	-
0	$gm_X(6)$	-

2	2	1	1	1	1	3	0
2	2	1	1	4	3	3	3
4	4	4	4	0	5	5	0
4	4	4	4	4	5	5	0
4	4	4	4	5	5	7	7
4	4	4	4	5	5	7	7
6	5	5	5	5	5	7	7
6	5	5	5	5	5	7	7

Рис. 3.34. Выращивание областей с помощью алгоритма WRG: цикл 18

Выращивание области 5 (см. рис. 3.34):

$$p(4) \leftarrow p(4) - 1, y_B \leftarrow gm_y(4,0), x_B \leftarrow gm_x(4,0) \Rightarrow y_B = 2, x_B = 6.$$

Выращивание области 6 (см. рис. 3.34): $p(5) = 0 \Rightarrow$ область сегментирована.

Выращивание области 7 (см. рис. 3.34): $p(6) = 0 \Rightarrow$ область сегментирована.

$$\sum_{k=0}^7 p(k) = 0 \Rightarrow \text{сегментация завершена.}$$

В результате сегментации выделено семь областей. Не сегментированы четыре пикселя.

3.2. Практические задания по разделению и слиянию областей

3.2.1. Для изображений $P = \|p(y, x)\|_{(y=0,7, x=0,7)}$, приведенных на рис. 3.35,

определить число L уровней квадродерева, порядок выборки квадрантов (пикселей) и сформировать матрицы сегментации $S(l) = \|s^{(l)}(y, x)\|_{(y=0,2^{3-l}-1, x=0,2^{3-l}-1)}$ для

каждого уровня l квадродерева по алгоритму квадродерева QT, приведенному в подразд. 1.2. Определить, имеет ли место пересегментация, и если имеет, то для каких пикселей изображения и почему. Предложить алгоритм решения данной проблемы.

Пример решения задачи для изображения $P1$, приведенного на рис. 3.35, a :

1) Число уровней квадродерева: $L = \log_2 Y = 3$. Пусть порядок выборки квадрантов (пикселей) изображения определяется рекурсивной Z -разверткой.

2) $l = 3$: $p(0,0) \neq p(0,1) \Rightarrow$ номер области не назначается (такая область обозначается символом « R »): $s^{(3)}(0,0) \leftarrow R$ (рис. 3.36, a).

3) $l = 2$: разбиение R -области на квадранты:

$$p(0,0) \neq p(0,1) \Rightarrow s^{(2)}(0,0) \leftarrow R \text{ (рис. 3.36, } b);$$

$$p(0,5) \neq p(0,6) \Rightarrow s^{(2)}(0,1) \leftarrow R;$$

$$p(5,0) \neq p(6,0) \Rightarrow s^{(2)}(1,0) \leftarrow R;$$

$\forall y \forall x (p(4,7) = p(y, x))$ при $y = \overline{4,7}, x = \overline{4,7} \Rightarrow$ выделяется однородная область, номер области 1: $s^{(2)}(1,1) \leftarrow 1$.

4) $l = 1$: разбиение каждой R -области на квадранты, перенос номеров выделенных областей на их элементы (подобласти, пиксели):

$$p(0,0) \neq p(0,1) \Rightarrow s^{(1)}(0,0) \leftarrow R \text{ (рис. 3.36, } в);$$

$$\forall y \forall x (p(0,2) = p(y, x)) \text{ при } y = \overline{0,1}, x = \overline{2,3} \Rightarrow s^{(1)}(0,1) \leftarrow 2;$$

$$\forall y \forall x (p(2,0) = p(y, x)) \text{ при } y = \overline{2,3}, x = \overline{0,1} \Rightarrow s^{(1)}(1,0) \leftarrow 3;$$

$\forall y \forall x (p(2,2) = p(y,x))$ при $y = \overline{2,3}, x = \overline{2,3}$ и $p(2,2) = p(2,0) \Rightarrow s^{(1)}(1,1) \leftarrow 3$;
 $p(0,4) \neq p(1,4) \Rightarrow s^{(1)}(0,2) \leftarrow R$;
 $p(0,6) \neq p(0,7) \Rightarrow s^{(1)}(0,3) \leftarrow R$;
 $p(2,4) \neq p(2,5) \Rightarrow s^{(1)}(1,2) \leftarrow R$;
 $p(2,6) \neq p(2,7) \Rightarrow s^{(1)}(1,3) \leftarrow R$;
 $\forall y \forall x (p(4,0) = p(y,x))$ при $y = \overline{4,5}, x = \overline{0,1}$ и $p(4,0) = p(2,0) \Rightarrow s^{(1)}(2,0) \leftarrow 3$;
 $\forall y \forall x (p(4,2) = p(y,x))$ при $y = \overline{4,5}, x = \overline{2,3}$ и $p(4,2) = p(4,0) \Rightarrow s^{(1)}(2,1) \leftarrow 3$;
 $\forall y \forall x (p(6,0) = p(y,x))$ при $y = \overline{6,7}, x = \overline{0,1} \Rightarrow s^{(1)}(3,0) \leftarrow 4$;
 $\forall y \forall x (p(6,2) = p(y,x))$ при $y = \overline{6,7}, x = \overline{2,3}$ и $p(6,2) = p(6,4) \Rightarrow s^{(1)}(3,1) \leftarrow 1$;
 $s^{(1)}(2,2) \leftarrow 1; s^{(1)}(2,3) \leftarrow 1; s^{(1)}(3,2) \leftarrow 1; s^{(1)}(3,3) \leftarrow 1$.

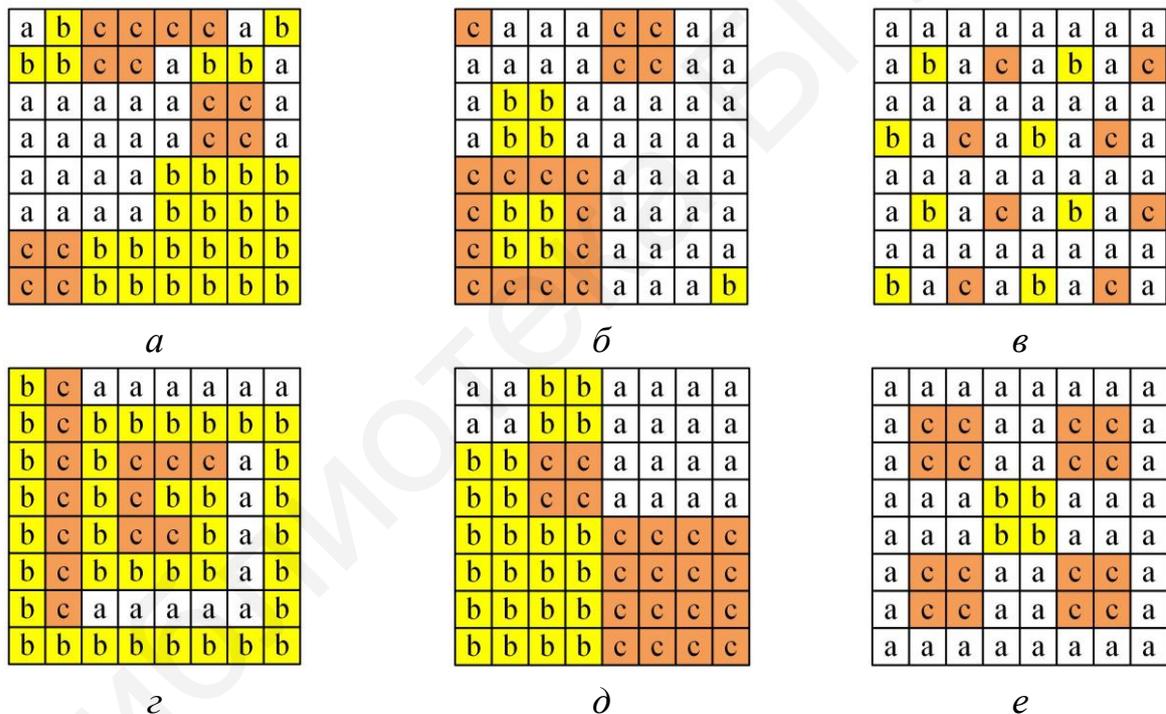


Рис. 3.35. Тестовые изображения:
a – P1; *б* – P2; *в* – P3; *г* – P4; *д* – P5; *е* – P6

5) $l=0$: разбиение каждой R -области на квадранты аналогично предыдущему шагу, но т. к. это последний уровень, то каждому пикселю присваивается номер области, к которой он принадлежит, в том числе с формированием новой области (рис. 3.36, z):

$s^{(0)}(0,0) \leftarrow 5; s^{(0)}(0,1) \leftarrow 6; s^{(0)}(1,0) \leftarrow 6; s^{(0)}(1,1) \leftarrow 6$;
 $s^{(0)}(0,2) \leftarrow 2; s^{(0)}(0,3) \leftarrow 2; s^{(0)}(1,2) \leftarrow 2; s^{(0)}(1,3) \leftarrow 2$;
 $s^{(0)}(2,0) \leftarrow 3; s^{(0)}(2,1) \leftarrow 3; s^{(0)}(3,0) \leftarrow 3; s^{(0)}(3,1) \leftarrow 3$;

$s^{(0)}(2,2) \leftarrow 3; s^{(0)}(2,3) \leftarrow 3; s^{(0)}(3,2) \leftarrow 3; s^{(0)}(3,3) \leftarrow 3;$
 $s^{(0)}(0,4) \leftarrow 2; s^{(0)}(0,5) \leftarrow 2; s^{(0)}(1,4) \leftarrow 3; s^{(0)}(1,5) \leftarrow 7;$
 $s^{(0)}(0,6) \leftarrow 8; s^{(0)}(0,7) \leftarrow 9; s^{(0)}(1,6) \leftarrow 9; s^{(0)}(1,7) \leftarrow 8;$
 $s^{(0)}(2,4) \leftarrow 3; s^{(0)}(2,5) \leftarrow 10; s^{(0)}(3,4) \leftarrow 3; s^{(0)}(3,5) \leftarrow 10;$
 $s^{(0)}(2,6) \leftarrow 10; s^{(0)}(2,7) \leftarrow 8; s^{(0)}(3,6) \leftarrow 10; s^{(0)}(3,7) \leftarrow 8;$
 $s^{(0)}(4,0) \leftarrow 3; s^{(0)}(4,1) \leftarrow 3; s^{(0)}(5,0) \leftarrow 3; s^{(0)}(5,1) \leftarrow 3;$
 $s^{(0)}(4,2) \leftarrow 3; s^{(0)}(4,3) \leftarrow 3; s^{(0)}(5,2) \leftarrow 3; s^{(0)}(5,3) \leftarrow 3;$
 $s^{(0)}(6,0) \leftarrow 4; s^{(0)}(6,1) \leftarrow 4; s^{(0)}(7,0) \leftarrow 4; s^{(0)}(7,1) \leftarrow 4;$
 $s^{(0)}(6,2) \leftarrow 1; s^{(0)}(6,3) \leftarrow 1; s^{(0)}(7,2) \leftarrow 1; s^{(0)}(7,3) \leftarrow 1;$
 $s^{(0)}(4,4) \leftarrow 1; s^{(0)}(4,5) \leftarrow 1; s^{(0)}(5,4) \leftarrow 1; s^{(0)}(5,5) \leftarrow 1;$
 $s^{(0)}(4,6) \leftarrow 1; s^{(0)}(4,7) \leftarrow 1; s^{(0)}(5,6) \leftarrow 1; s^{(0)}(5,7) \leftarrow 1;$
 $s^{(0)}(6,4) \leftarrow 1; s^{(0)}(6,5) \leftarrow 1; s^{(0)}(7,4) \leftarrow 1; s^{(0)}(7,5) \leftarrow 1;$
 $s^{(0)}(6,6) \leftarrow 1; s^{(0)}(6,7) \leftarrow 1; s^{(0)}(7,6) \leftarrow 1; s^{(0)}(7,7) \leftarrow 1.$

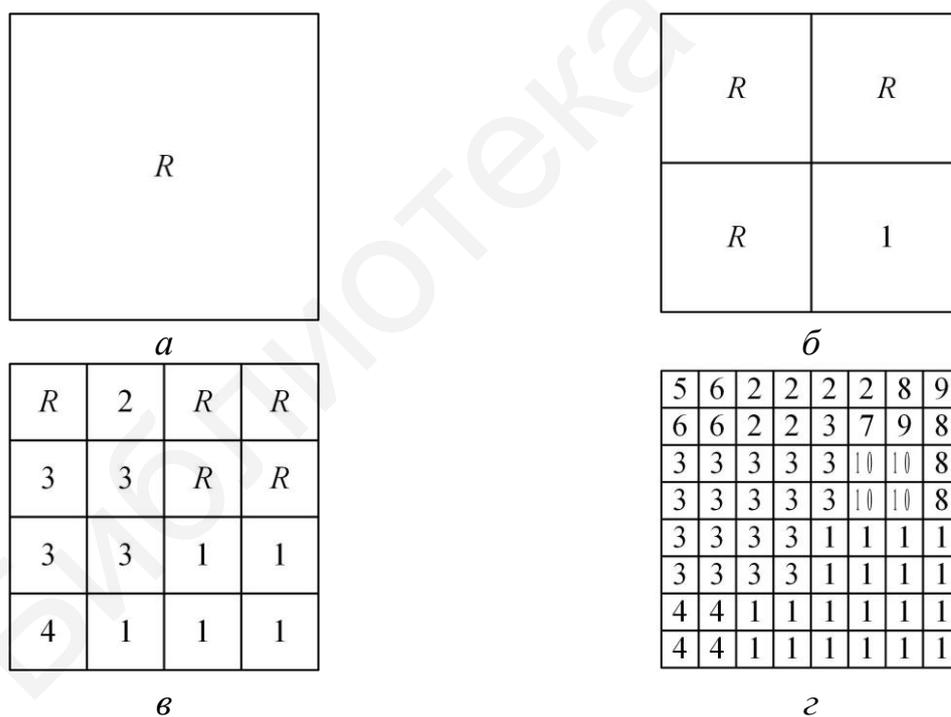


Рис. 3.36. Матрицы $S(l)$ для уровней $l = \overline{3,0}$, построенные для тестового изображения $P1$ с использованием алгоритма QT:
 $a - S(3); б - S(2); в - S(1); г - S(0)$

Для пикселей $p(0,7)$ и $p(1,6)$ имеет место пересегментация, т. к. на момент обработки пикселя $p(0,7)$ пиксель $p(1,6)$ не был сегментирован (вы-

борка квадрантов и пикселей происходит по рекурсивной Z-развертке), а на момент обработки пикселя $p(1,6)$ для пикселя $p(0,7)$ было установлено $s^{(0)}(0,7)=9$. Решить данную проблему можно за счет проверки выполнения дополнительного условия $p(0,7)=p(1,6) \wedge p(1,6)=p(1,5)$. Поскольку пиксель $p(1,5)$ уже обработан и $s^{(0)}(1,5)=7$, то $s^{(0)}(0,7) \leftarrow 7$, и т. к. $p(1,6)=p(0,7)$, то $s^{(0)}(1,6) \leftarrow 7$.

3.2.2. Для изображений $P = \left\| p(y, x) \right\|_{(y=\overline{0,7}, x=\overline{0,7})}$, приведенных на рис. 3.35, сформировать вложенные коды $C_{QT} = \left\| c_{QT}(z) \right\|_{(z=0, N_{QT}-1)}$ по алгоритму квадродерева QT, приведенному в подразд. 1.2. Сравнить полученные коды по длине. Сделать вывод о влиянии структуры изображения на компактность представления информации о сегментах.

Пример решения задачи для изображения $P1$, приведенного на рис. 3.35, *a*:

1) Число уровней квадродерева: $L = \log_2 Y = 3$. Пусть порядок выборки квадрантов (пикселей) изображения определяется рекурсивной Z-разверткой.

2) $l = 3$: $p(0,0) \neq p(0,1) \Rightarrow c_{QT}(0) \leftarrow 1$ (рис. 3.37).

3) $l = 2$:

$c_{QT}(0) = 1 \Rightarrow$ разбиение R -области на квадранты:

$p(0,0) \neq p(0,1) \Rightarrow c_{QT}(1) \leftarrow 1$;

$p(0,5) \neq p(0,6) \Rightarrow c_{QT}(2) \leftarrow 1$;

$p(5,0) \neq p(6,0) \Rightarrow c_{QT}(3) \leftarrow 1$;

$\forall y \forall x (p(4,7) = p(y, x))$ при $y = \overline{4,7}, x = \overline{4,7} \Rightarrow c_{QT}(4) \leftarrow 0$.

4) $l = 1$:

$c_{QT}(1) = 1 \Rightarrow$ разбиение области $R(0,0)$ на квадранты:

$p(0,0) \neq p(0,1) \Rightarrow c_{QT}(5) \leftarrow 1$;

$\forall y \forall x (p(0,2) = p(y, x))$ при $y = \overline{0,1}, x = \overline{2,3} \Rightarrow c_{QT}(6) \leftarrow 0$;

$\forall y \forall x (p(2,0) = p(y, x))$ при $y = \overline{2,3}, x = \overline{0,1} \Rightarrow c_{QT}(7) \leftarrow 0$;

$\forall y \forall x (p(2,2) = p(y, x))$ при $y = \overline{2,3}, x = \overline{2,3} \Rightarrow c_{QT}(8) \leftarrow 0$;

$c_{QT}(2) = 1 \Rightarrow$ разбиение области $R(0,1)$ на квадранты:

$p(0,4) \neq p(1,4) \Rightarrow c_{QT}(9) \leftarrow 1$;

$p(0,6) \neq p(0,7) \Rightarrow c_{QT}(10) \leftarrow 1$;

$p(2,4) \neq p(2,5) \Rightarrow c_{QT}(11) \leftarrow 1$;

$p(2,6) \neq p(2,7) \Rightarrow c_{QT}(12) \leftarrow 1$;

$c_{QT}(3)=1 \Rightarrow$ разбиение области $R(1,0)$ на квадранты:

$\forall y \forall x (p(4,0) = p(y,x))$ при $y = \overline{4,5}, x = \overline{0,1} \Rightarrow c_{QT}(13) \leftarrow 0;$

$\forall y \forall x (p(4,2) = p(y,x))$ при $y = \overline{4,5}, x = \overline{2,3} \Rightarrow c_{QT}(14) \leftarrow 0;$

$\forall y \forall x (p(6,0) = p(y,x))$ при $y = \overline{6,7}, x = \overline{0,1} \Rightarrow c_{QT}(15) \leftarrow 0;$

$\forall y \forall x (p(6,2) = p(y,x))$ при $y = \overline{6,7}, x = \overline{2,3} \Rightarrow c_{QT}(16) \leftarrow 0.$

Таким образом, длина кода, описывающего структуру квадродерева, составляет 17 бит: 11110100011110000.

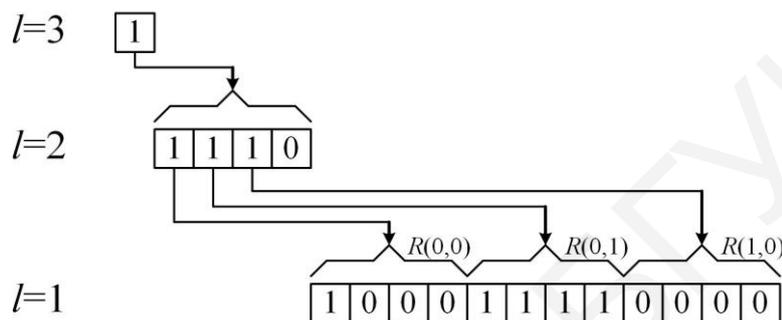


Рис. 3.37. Построение квадродерева по алгоритму QT для п. 3.2.2

3.2.3. Для изображений $P = \|p(y,x)\|_{(y=\overline{0,7}, x=\overline{0,7})}$, приведенных на рис. 3.35,

сформировать вложенные коды $C_{QT} = \|c_{QT}(z)\|_{(z=\overline{0, N_{QT}-1})}$ со вставками номеров сегментов

$s^{(l)}(y,x)$ по алгоритму квадродерева QT, приведенному в подразд. 1.2.

Определить коэффициент сжатия сегментированного изображения, представленного таким вложенным кодом. Записать полученный код в десятичном и двоичном виде. Как надо изменить алгоритм и код, чтобы иметь возможность компактного представления исходного (несегментированного) изображения?

Пример решения задачи для изображения $P1$, приведенного на рис. 3.35, a :

1) Число уровней квадродерева: $L = \log_2 Y = 3$. Пусть порядок выборки квадрантов (пикселей) изображения определяется рекурсивной Z-разверткой.

2) $l=3$: $p(0,0) \neq p(0,1) \Rightarrow c_{QT}(0) \leftarrow 1$ (рис. 3.38).

3) $l=2$:

$c_{QT}(0)=1 \Rightarrow$ разбиение $R^{(3)}$ -области на квадранты:

$p(0,0) \neq p(0,1) \Rightarrow c_{QT}(1) \leftarrow 1;$

$p(0,5) \neq p(0,6) \Rightarrow c_{QT}(2) \leftarrow 1;$

$p(5,0) \neq p(6,0) \Rightarrow c_{QT}(3) \leftarrow 1;$

$\forall y \forall x (p(4,7) = p(y,x))$ при $y = \overline{4,7}, x = \overline{4,7} \Rightarrow c_{QT}(4) \leftarrow 0, s^{(2)}(1,1) \leftarrow 1.$

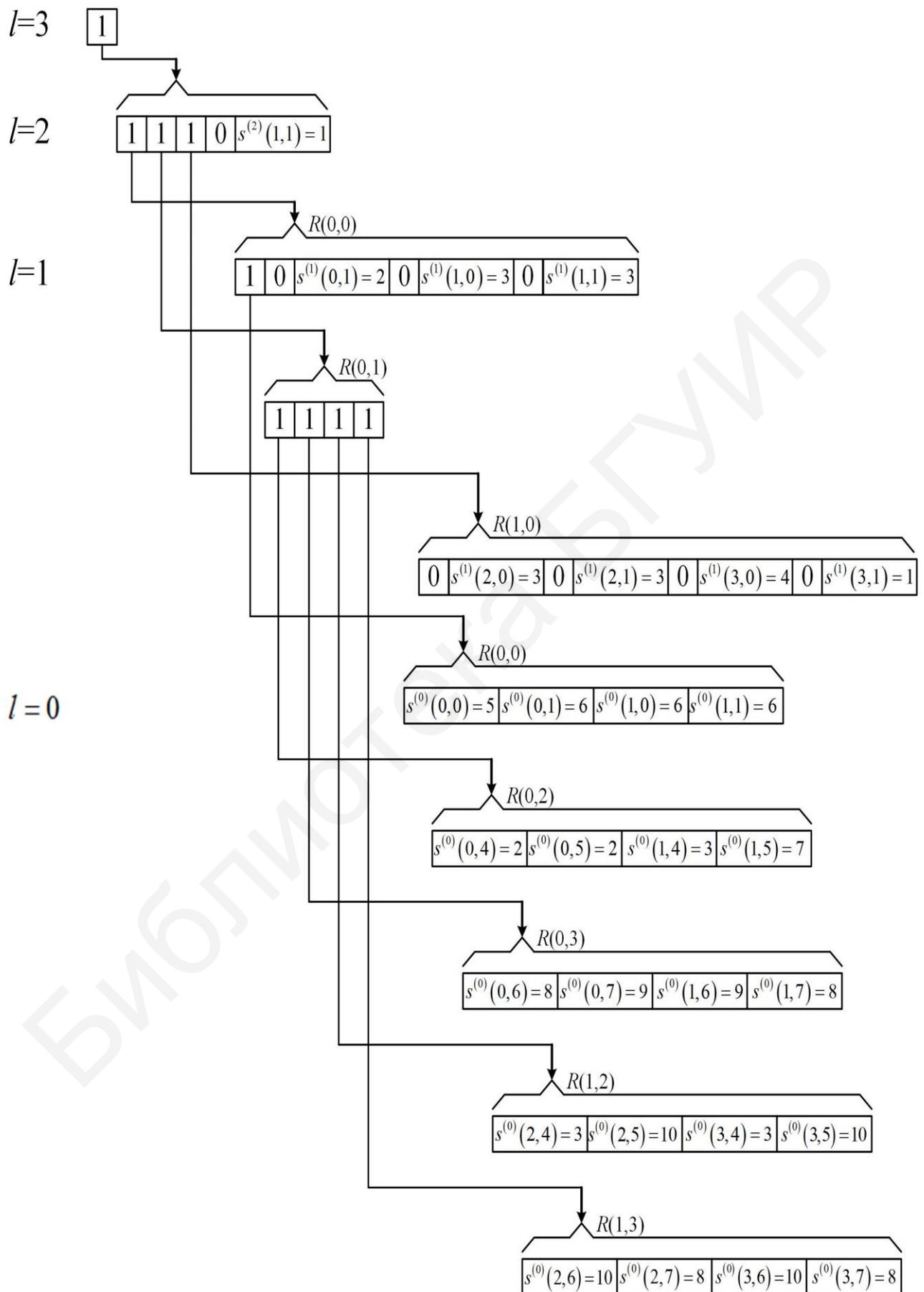


Рис. 3.38. Построение квадродерева по алгоритму QT для п. 3.2.3

4) $l=1$:

$c_{QT}(1)=1 \Rightarrow$ разбиение области $R^{(2)}(0,0)$ на квадранты:

$$p(0,0) \neq p(0,1) \Rightarrow c_{QT}(5) \leftarrow 1;$$

$$\forall y \forall x (p(0,2) = p(y,x)) \text{ при } y = \overline{0,1}, x = \overline{2,3} \Rightarrow c_{QT}(6) \leftarrow 0, s^{(1)}(0,1) \leftarrow 2;$$

$$\forall y \forall x (p(2,0) = p(y,x)) \text{ при } y = \overline{2,3}, x = \overline{0,1} \Rightarrow c_{QT}(7) \leftarrow 0, s^{(1)}(1,0) \leftarrow 3;$$

$$\forall y \forall x (p(2,2) = p(y,x)) \text{ при } y = \overline{2,3}, x = \overline{2,3} \Rightarrow c_{QT}(8) \leftarrow 0, s^{(1)}(1,1) \leftarrow 3;$$

$c_{QT}(2)=1 \Rightarrow$ разбиение области $R^{(2)}(0,1)$ на квадранты:

$$p(0,4) \neq p(1,4) \Rightarrow c_{QT}(9) \leftarrow 1;$$

$$p(0,6) \neq p(0,7) \Rightarrow c_{QT}(10) \leftarrow 1;$$

$$p(2,4) \neq p(2,5) \Rightarrow c_{QT}(11) \leftarrow 1;$$

$$p(2,6) \neq p(2,7) \Rightarrow c_{QT}(12) \leftarrow 1;$$

$c_{QT}(3)=1 \Rightarrow$ разбиение области $R^{(2)}(1,0)$ на квадранты:

$$\forall y \forall x (p(4,0) = p(y,x)) \text{ при } y = \overline{4,5}, x = \overline{0,1} \Rightarrow c_{QT}(13) \leftarrow 0, s^{(1)}(2,0) \leftarrow 3;$$

$$\forall y \forall x (p(4,2) = p(y,x)) \text{ при } y = \overline{4,5}, x = \overline{2,3} \Rightarrow c_{QT}(14) \leftarrow 0, s^{(1)}(2,1) \leftarrow 3;$$

$$\forall y \forall x (p(6,0) = p(y,x)) \text{ при } y = \overline{6,7}, x = \overline{0,1} \Rightarrow c_{QT}(15) \leftarrow 0, s^{(1)}(3,0) \leftarrow 4;$$

$$\forall y \forall x (p(6,2) = p(y,x)) \text{ при } y = \overline{6,7}, x = \overline{2,3} \Rightarrow c_{QT}(16) \leftarrow 0, s^{(1)}(3,1) \leftarrow 1.$$

5) $l=0$:

$c_{QT}(5)=1 \Rightarrow$ распределение номеров сегментов в области $R^{(1)}(0,0)$:

$$s^{(0)}(0,0) \leftarrow 5;$$

$$p(0,1) \neq p(0,0), p(0,1) \neq p(0,2) \Rightarrow s^{(0)}(0,1) \leftarrow 6;$$

$$p(1,0) = p(0,1) \Rightarrow s^{(0)}(1,0) \leftarrow 6;$$

$$p(1,1) = p(0,1) \Rightarrow s^{(0)}(1,1) \leftarrow 6;$$

$c_{QT}(9)=1 \Rightarrow$ распределение номеров сегментов в области $R^{(1)}(0,2)$:

$$p(0,4) = p(0,3) \text{ и } s^{(1)}(0,1) = 2 \Rightarrow s^{(0)}(0,4) \leftarrow 2;$$

$$p(0,5) = p(0,4) \Rightarrow s^{(0)}(0,5) \leftarrow 2;$$

$$p(1,4) = p(2,3) \text{ и } s^{(1)}(1,1) = 3 \Rightarrow s^{(0)}(1,4) \leftarrow 3;$$

$$p(1,5) \neq p(1,4), p(1,5) \neq p(0,4), p(1,5) \neq p(0,5) \Rightarrow s^{(0)}(1,5) \leftarrow 7;$$

$c_{QT}(10)=1 \Rightarrow$ распределение номеров сегментов в области $R^{(1)}(0,3)$:

$$p(0,6) \neq p(0,5), p(0,6) \neq p(1,5) \Rightarrow s^{(0)}(0,6) \leftarrow 8;$$

$$p(0,7) \neq p(0,6) \Rightarrow s^{(0)}(0,7) \leftarrow 9;$$

$$p(1,6) = p(0,7) \Rightarrow s^{(0)}(1,6) \leftarrow 9;$$

$$p(1,7) = p(0,6) \Rightarrow s^{(0)}(1,7) \leftarrow 8;$$

$c_{QT}(11) = 1 \Rightarrow$ распределение номеров сегментов в области $R^{(1)}(1,2)$:

$$p(2,4) = p(2,3) \text{ и } s^{(1)}(1,1) = 3 \Rightarrow s^{(0)}(2,4) \leftarrow 3;$$

$$p(2,5) \neq p(2,4), p(2,5) \neq p(1,4), p(2,5) \neq p(2,5) \Rightarrow s^{(0)}(2,5) \leftarrow 10;$$

$$p(3,4) = p(2,4) \text{ и } s^{(0)}(2,4) = 3 \Rightarrow s^{(0)}(3,4) \leftarrow 3;$$

$$p(3,5) = p(2,5) \text{ и } s^{(0)}(2,5) = 10 \Rightarrow s^{(0)}(3,5) \leftarrow 10;$$

$c_{QT}(12) = 1 \Rightarrow$ распределение номеров сегментов в области $R^{(1)}(1,3)$:

$$p(2,6) = p(2,5) \text{ и } s^{(0)}(2,5) = 10 \Rightarrow s^{(0)}(2,6) \leftarrow 10;$$

$$p(2,7) = p(1,7) \text{ и } s^{(0)}(1,7) = 8 \Rightarrow s^{(0)}(2,7) \leftarrow 8;$$

$$p(3,6) = p(2,6) \text{ и } s^{(0)}(2,6) = 10 \Rightarrow s^{(0)}(3,6) \leftarrow 10;$$

$$p(3,7) = p(2,7) \text{ и } s^{(0)}(2,7) = 8 \Rightarrow s^{(0)}(3,7) \leftarrow 8.$$

Число сегментов $N_s = 10$. Поэтому число бит на кодирование номеров сегментов $\lceil \log_2(N_s) \rceil = 4$. Таким образом, длина кода, описывающего структуру квадродерева, составляет $17 + 4 \cdot 28 = 113$ бит (число символов вложенного кода $N_c = 45$, из которых 17 кодируются одним битом, 28 – четырьмя битами). Если в исходном изображении используются три значения яркости, то число бит на его представление составляет $8 \cdot 8 \cdot \lceil \log_2(3) \rceil = 128$. Тогда коэффициент сжатия сегментированного изображения за счет его представления в виде квадродерева составляет $128 : 113 = 1,13$ раза.

Результирующий код $C_E = \|c_E(z)\|_{(z=0, N_c-1)}$ в десятичном виде (для простоты анализа символы разделены пробелами, номер сегмента представляется двумя символами):

1 1 1 1 0 01 1 0 02 0 03 0 03 1 1 1 1 0 03 0 03 0 04 0 01 05 06 06 06 02 02 03 07 08
09 09 08 03 10 03 10 10 08 10 08.

Результирующий код $C_E = \|c_E(z)\|_{(z=0, N_c-1)}$ в двоичном виде (для простоты анализа символы разделены пробелами, номер сегмента представляется четырьмя символами):

1 1 1 1 0 0001 1 0 0010 0 0011 0 0011 1 1 1 1 0 0011 0 0011 0 0100 0 0001 0101
0110 0110 0110 0010 0010 0011 0111 1000 1001 1001 1000 0011 1010 0011 1010
1010 1000 1010 1000.

3.2.4. По вложенным кодам, полученным в п. 3.2.3 и описывающим сегментированное изображение, восстановить матрицы сегментации $S(l) = \|s^{(l)}(y, x)\|_{(y=0, 2^{3-l}-1, x=0, 2^{3-l}-1)}$ для каждого уровня l квадродерева по алгоритму квадродерева QT, приведенному в подразд. 1.2. Сравнить их с матрицами сегментации, полученными в п. 3.2.1.

Пример решения задачи для изображения $P1$, приведенного на рис. 3.35, a :

1) Число уровней квадродерева: $L = \log_2 Y = 3$. Пусть порядок выборки квадрантов (пикселей) изображения определяется рекурсивной Z -разверткой. Вложенный код $C_E = \|c_E(z)\|_{(z=0, N_C-1)}$ в десятичном виде: 1 1 1 1 0 01 1 0 02 0 03 0 03 1 1 1 1 0 03 0 03 0 04 0 01 05 06 06 06 02 02 03 07 08 09 09 08 03 10 03 10 10 08 10 08. Число символов вложенного кода $N_C = 45$.

2) $l = 3$ (см. рис. 3.36, a):

$$c_E(0)=1 \Rightarrow s^{(3)}(0,0) \leftarrow R.$$

3) $l = 2$ (см. рис. 3.36, b):

$$s^{(3)}(0,0) = R \Rightarrow$$

$$c_E(1)=1 \Rightarrow s^{(2)}(0,0) \leftarrow R;$$

$$c_E(2)=1 \Rightarrow s^{(2)}(0,1) \leftarrow R;$$

$$c_E(3)=1 \Rightarrow s^{(2)}(1,0) \leftarrow R;$$

$$c_E(4)=0 \text{ и } c_E(5)=01 \Rightarrow s^{(2)}(1,1) \leftarrow 1.$$

4) $l = 1$ (см. рис. 3.36, $в$):

$$s^{(2)}(0,0) = R \Rightarrow$$

$$c_E(6)=1 \Rightarrow s^{(1)}(0,0) \leftarrow R;$$

$$c_E(7)=0 \text{ и } c_E(8)=02 \Rightarrow s^{(1)}(0,1) \leftarrow 2;$$

$$c_E(9)=0 \text{ и } c_E(10)=03 \Rightarrow s^{(1)}(1,0) \leftarrow 3;$$

$$c_E(11)=0 \text{ и } c_E(12)=03 \Rightarrow s^{(1)}(1,1) \leftarrow 3;$$

$$s^{(2)}(0,1) = R \Rightarrow$$

$$c_E(13)=1 \Rightarrow s^{(1)}(0,2) \leftarrow R;$$

$$c_E(14)=1 \Rightarrow s^{(1)}(0,3) \leftarrow R;$$

$$c_E(15)=1 \Rightarrow s^{(1)}(1,2) \leftarrow R;$$

$$c_E(16)=1 \Rightarrow s^{(1)}(1,3) \leftarrow R;$$

$$s^{(2)}(1,0) = R \Rightarrow$$

$$c_E(17)=0 \text{ и } c_E(18)=03 \Rightarrow s^{(1)}(2,0) \leftarrow 3;$$

$$c_E(19)=0 \text{ и } c_E(20)=03 \Rightarrow s^{(1)}(2,1) \leftarrow 3;$$

$$c_E(21)=0 \text{ и } c_E(22)=04 \Rightarrow s^{(1)}(3,0) \leftarrow 4;$$

$$c_E(23)=0 \text{ и } c_E(24)=01 \Rightarrow s^{(1)}(3,1) \leftarrow 1;$$

$$s^{(2)}(1,1) = 1 \Rightarrow$$

$$s^{(1)}(2,2) \leftarrow 1; s^{(1)}(2,3) \leftarrow 1; s^{(1)}(3,2) \leftarrow 1; s^{(1)}(3,3) \leftarrow 1.$$

5) $l = 0$ (см. рис. 3.36, з):

$$s^{(1)}(0,0) = R \Rightarrow$$

$$c_E(25)=05 \Rightarrow s^{(0)}(0,0) \leftarrow 5; c_E(26)=06 \Rightarrow s^{(0)}(0,1) \leftarrow 6;$$

$$c_E(27)=06 \Rightarrow s^{(0)}(1,0) \leftarrow 6; c_E(28)=06 \Rightarrow s^{(0)}(1,1) \leftarrow 6;$$

$$s^{(1)}(0,1) = 2 \Rightarrow$$

$$s^{(0)}(0,2) \leftarrow 2; s^{(0)}(0,3) \leftarrow 2; s^{(0)}(1,2) \leftarrow 2; s^{(0)}(1,3) \leftarrow 2;$$

$$s^{(1)}(1,0) = 3 \Rightarrow$$

$$s^{(0)}(2,0) \leftarrow 3; s^{(0)}(2,1) \leftarrow 3; s^{(0)}(3,0) \leftarrow 3; s^{(0)}(3,1) \leftarrow 3;$$

$$s^{(1)}(1,1) = 3 \Rightarrow$$

$$s^{(0)}(2,2) \leftarrow 3; s^{(0)}(2,3) \leftarrow 3; s^{(0)}(3,2) \leftarrow 3; s^{(0)}(3,3) \leftarrow 3;$$

$$s^{(1)}(0,2) = R \Rightarrow$$

$$c_E(29)=02 \Rightarrow s^{(0)}(0,4) \leftarrow 2; c_E(30)=02 \Rightarrow s^{(0)}(0,5) \leftarrow 2;$$

$$c_E(31)=03 \Rightarrow s^{(0)}(1,4) \leftarrow 3; c_E(32)=07 \Rightarrow s^{(0)}(1,5) \leftarrow 7;$$

$$s^{(1)}(0,3) = R \Rightarrow$$

$$c_E(33)=08 \Rightarrow s^{(0)}(0,6) \leftarrow 8; c_E(34)=09 \Rightarrow s^{(0)}(0,7) \leftarrow 9;$$

$$c_E(35)=09 \Rightarrow s^{(0)}(1,6) \leftarrow 9; c_E(36)=08 \Rightarrow s^{(0)}(1,7) \leftarrow 8;$$

$$s^{(1)}(1,2) = R \Rightarrow$$

$$c_E(37)=03 \Rightarrow s^{(0)}(2,4) \leftarrow 3; c_E(38)=10 \Rightarrow s^{(0)}(2,5) \leftarrow 10;$$

$$c_E(39)=03 \Rightarrow s^{(0)}(3,4) \leftarrow 3; c_E(40)=10 \Rightarrow s^{(0)}(3,5) \leftarrow 10;$$

$$s^{(1)}(1,3) = R \Rightarrow$$

$$c_E(41)=10 \Rightarrow s^{(0)}(2,6) \leftarrow 10; c_E(42)=8 \Rightarrow s^{(0)}(2,7) \leftarrow 8;$$

$$c_E(43)=10 \Rightarrow s^{(0)}(3,6) \leftarrow 10; c_E(44)=8 \Rightarrow s^{(0)}(3,7) \leftarrow 8;$$

$$s^{(1)}(2,0) = 3 \Rightarrow$$

$$s^{(0)}(4,0) \leftarrow 3; s^{(0)}(4,1) \leftarrow 3; s^{(0)}(5,0) \leftarrow 3; s^{(0)}(5,1) \leftarrow 3;$$

$$s^{(1)}(2,1) \leftarrow 3 \Rightarrow$$

$$s^{(0)}(4,2) \leftarrow 3; s^{(0)}(4,3) \leftarrow 3; s^{(0)}(5,2) \leftarrow 3; s^{(0)}(5,3) \leftarrow 3;$$

$$s^{(1)}(3,0) \leftarrow 4 \Rightarrow$$

$$s^{(0)}(6,0) \leftarrow 4; s^{(0)}(6,1) \leftarrow 4; s^{(0)}(7,0) \leftarrow 4; s^{(0)}(7,1) \leftarrow 4;$$

$$s^{(1)}(3,1) \leftarrow 1 \Rightarrow$$

$$s^{(0)}(6,2) \leftarrow 1; s^{(0)}(6,3) \leftarrow 1; s^{(0)}(7,2) \leftarrow 1; s^{(0)}(7,3) \leftarrow 1;$$

$$s^{(1)}(2,2) \leftarrow 1 \Rightarrow$$

$$\begin{aligned}
& s^{(0)}(4,4) \leftarrow 1; s^{(0)}(4,5) \leftarrow 1; s^{(0)}(5,4) \leftarrow 1; s^{(0)}(5,5) \leftarrow 1; \\
& s^{(1)}(2,3) \leftarrow 1 \Rightarrow \\
& s^{(0)}(4,6) \leftarrow 1; s^{(0)}(4,7) \leftarrow 1; s^{(0)}(5,6) \leftarrow 1; s^{(0)}(5,7) \leftarrow 1; \\
& s^{(1)}(3,2) \leftarrow 1 \Rightarrow \\
& s^{(0)}(6,4) \leftarrow 1; s^{(0)}(6,5) \leftarrow 1; s^{(0)}(7,4) \leftarrow 1; s^{(0)}(7,5) \leftarrow 1; \\
& s^{(1)}(3,3) \leftarrow 1 \Rightarrow \\
& s^{(0)}(6,6) \leftarrow 1; s^{(0)}(6,7) \leftarrow 1; s^{(0)}(7,6) \leftarrow 1; s^{(0)}(7,7) \leftarrow 1.
\end{aligned}$$

Таким образом, полученные матрицы сегментации полностью совпадают с матрицами сегментации, приведенными на рис. 3.36.

3.2.5. Для изображений $P = \|p(y, x)\|_{(y=0, \overline{7}, x=0, \overline{7})}$, приведенных на рис. 3.35, определить число L уровней квадродерева, порядок выборки квадрантов (пикселей) и сформировать матрицы аппроксимации $A(l) = \|a^{(l)}(y, x)\|_{(y=0, Y/2^l-1, x=0, X/2^l-1)}$ и кластеризации $C(l) = \|c^{(l)}(y, x)\|_{(y=0, Y/2^l-1, x=0, X/2^l-1)}$ для каждого уровня l квадродерева по алгоритму квадродерева RQT, приведенному в подразд. 2.2 (прямая кластеризация). Построить вложенные коды $C_{PQT} = \|c_{PQT}(z)\|_{(z=0, N_{PQT}-1)}$. Сравнить вложенные коды, полученные для различных тестовых изображений, между собой и со вложенными кодами C_{QT} , полученными по алгоритму QT в п. 3.2.2.

Пример решения задачи для изображения $P1$, приведенного на рис. 3.35, a :

1) Число уровней квадродерева: $L = \log_2 Y = 3$. Пусть порядок выборки квадрантов (пикселей) изображения определяется рекурсивной Z -разверткой.

2) $l = 1$ (рис. 3.39, $a, б$): поскольку $\forall y \forall x (c^{(0)}(y, x) = 0)$, то для построения матрицы $C(1)$ необходимо сначала построить матрицу $A(1)$:

$$\begin{aligned}
& a^{(1)}(0,0) \leftarrow \frac{3a+b}{4}; a^{(1)}(0,1) \leftarrow c; a^{(1)}(1,0) \leftarrow a; a^{(1)}(1,1) \leftarrow a; \\
& a^{(1)}(0,2) \leftarrow \frac{a+b+2c}{4}; a^{(1)}(0,3) \leftarrow \frac{a+b}{2}; a^{(1)}(1,2) \leftarrow \frac{a+c}{2}; a^{(1)}(1,3) \leftarrow \frac{a+c}{2}; \\
& a^{(1)}(2,0) \leftarrow a; a^{(1)}(2,1) \leftarrow a; a^{(1)}(3,0) \leftarrow c; a^{(1)}(3,1) \leftarrow b; \\
& a^{(1)}(2,2) \leftarrow b; a^{(1)}(2,3) \leftarrow b; a^{(1)}(3,2) \leftarrow b; a^{(1)}(3,3) \leftarrow b.
\end{aligned}$$

На основе матрицы $A(1)$ строится матрица $C(1)$:

$$a^{(0)}(0,0) \neq a^{(1)}(0,0) \Rightarrow c^{(1)}(0,0) \leftarrow 1;$$

$$\begin{aligned}
a^{(0)}(0,2) &= a^{(1)}(0,1), & a^{(0)}(0,3) &= a^{(1)}(0,1), & a^{(0)}(1,2) &= a^{(1)}(0,1), \\
a^{(0)}(1,3) &= a^{(1)}(0,1) \Rightarrow c^{(1)}(0,1) \leftarrow 0; & & & & \\
a^{(0)}(2,0) &= a^{(1)}(1,0), & a^{(0)}(2,1) &= a^{(1)}(1,0), & a^{(0)}(3,0) &= a^{(1)}(1,0), \\
a^{(0)}(3,1) &= a^{(1)}(1,0) \Rightarrow c^{(1)}(1,0) \leftarrow 0; & & & & \\
a^{(0)}(2,2) &= a^{(1)}(1,1), & a^{(0)}(2,3) &= a^{(1)}(1,1), & a^{(0)}(3,2) &= a^{(1)}(1,1), \\
a^{(0)}(3,3) &= a^{(1)}(1,1) \Rightarrow c^{(1)}(1,1) \leftarrow 0; & & & & \\
a^{(0)}(0,4) &\neq a^{(1)}(0,2) \Rightarrow c^{(1)}(0,2) \leftarrow 1; & & & & \\
a^{(0)}(0,6) &\neq a^{(1)}(0,3) \Rightarrow c^{(1)}(0,3) \leftarrow 1; & & & & \\
a^{(0)}(2,4) &\neq a^{(1)}(1,2) \Rightarrow c^{(1)}(1,2) \leftarrow 1; & & & & \\
a^{(0)}(2,6) &\neq a^{(1)}(1,3) \Rightarrow c^{(1)}(1,3) \leftarrow 1; & & & & \\
a^{(0)}(4,0) &= a^{(1)}(2,0), & a^{(0)}(4,1) &= a^{(1)}(2,0), & a^{(0)}(5,0) &= a^{(1)}(2,0), \\
a^{(0)}(5,1) &= a^{(1)}(2,0) \Rightarrow c^{(1)}(2,0) \leftarrow 0; & & & & \\
a^{(0)}(4,2) &= a^{(1)}(2,1), & a^{(0)}(4,3) &= a^{(1)}(2,1), & a^{(0)}(5,2) &= a^{(1)}(2,1), \\
a^{(0)}(5,3) &= a^{(1)}(2,1) \Rightarrow c^{(1)}(2,1) \leftarrow 0; & & & & \\
a^{(0)}(6,0) &= a^{(1)}(3,0), & a^{(0)}(6,1) &= a^{(1)}(3,0), & a^{(0)}(7,0) &= a^{(1)}(3,0), \\
a^{(0)}(7,1) &= a^{(1)}(3,0) \Rightarrow c^{(1)}(3,0) \leftarrow 0; & & & & \\
a^{(0)}(6,2) &= a^{(1)}(3,1), & a^{(0)}(6,3) &= a^{(1)}(3,1), & a^{(0)}(7,2) &= a^{(1)}(3,1), \\
a^{(0)}(7,3) &= a^{(1)}(3,1) \Rightarrow c^{(1)}(3,1) \leftarrow 0; & & & & \\
a^{(0)}(4,4) &= a^{(1)}(2,2), & a^{(0)}(4,5) &= a^{(1)}(2,2), & a^{(0)}(5,4) &= a^{(1)}(2,2), \\
a^{(0)}(5,5) &= a^{(1)}(2,2) \Rightarrow c^{(1)}(2,2) \leftarrow 0; & & & & \\
a^{(0)}(4,6) &= a^{(1)}(2,3), & a^{(0)}(4,7) &= a^{(1)}(2,3), & a^{(0)}(5,6) &= a^{(1)}(2,3), \\
a^{(0)}(5,7) &= a^{(1)}(2,3) \Rightarrow c^{(1)}(2,3) \leftarrow 0; & & & & \\
a^{(0)}(6,4) &= a^{(1)}(3,2), & a^{(0)}(6,5) &= a^{(1)}(3,2), & a^{(0)}(7,4) &= a^{(1)}(3,2), \\
a^{(0)}(7,5) &= a^{(1)}(3,2) \Rightarrow c^{(1)}(3,2) \leftarrow 0; & & & & \\
a^{(0)}(6,6) &= a^{(1)}(3,3), & a^{(0)}(6,7) &= a^{(1)}(3,3), & a^{(0)}(7,6) &= a^{(1)}(3,3), \\
a^{(0)}(7,7) &= a^{(1)}(3,3) \Rightarrow c^{(1)}(3,3) \leftarrow 0. & & & &
\end{aligned}$$

3) $l = 2$ (рис. 3.39, в, з): в матрице $C(1)$ $\exists y \exists x (c^{(1)}(y, x) = 1)$, поэтому при построении матрицы $C(2)$ необходимо сначала проверить элементы матрицы $C(1)$ и рассчитывать значения элементов $a^{(2)}(y, x)$, для которых $c^{(1)}(y, x) = 0$:

$$c^{(1)}(0,0) = 1 \Rightarrow c^{(2)}(0,0) \leftarrow 1;$$

$$c^{(1)}(0,2)=1 \Rightarrow c^{(2)}(0,1) \leftarrow 1;$$

$$c^{(1)}(2,0)=0, \quad c^{(1)}(2,1)=0, \quad c^{(1)}(3,0)=0, \quad c^{(1)}(3,1)=0, \quad a^{(2)}(1,0)=\frac{2a+b+c}{4},$$

$$a^{(1)}(2,0) \neq a^{(2)}(1,0) \Rightarrow c^{(2)}(1,0) \leftarrow 1;$$

$$c^{(1)}(2,2)=0, \quad c^{(1)}(2,3)=0, \quad c^{(1)}(3,2)=0, \quad c^{(1)}(3,3)=0, \quad a^{(2)}(1,1)=b,$$

$$a^{(1)}(2,2)=a^{(2)}(1,1), \quad a^{(1)}(2,3)=a^{(2)}(1,1), \quad a^{(1)}(3,2)=a^{(2)}(1,1), \quad a^{(1)}(3,3)=a^{(2)}(1,1) \Rightarrow \\ \Rightarrow c^{(2)}(1,1) \leftarrow 0.$$

4) $l=3$:

$$c^{(2)}(0,0)=1 \Rightarrow c^{(3)}(0,0)=1.$$

Длина кода, описывающего структуру квадродерева, составляет 17 бит:
11110100011110000.

$\frac{3a+b}{4}$	c	$\frac{a+b+2c}{4}$	$\frac{a+b}{2}$
a	a	$\frac{a+c}{2}$	$\frac{a+c}{2}$
a	a	b	b
c	b	b	b

a

1	0	1	1
0	0	1	1
0	0	0	0
0	0	0	0

\bar{b}

~	~
$\frac{2a+b+c}{4}$	b

\bar{v}

1	1
1	0

\bar{z}

Рис. 3.39. Матрицы $A(l)$ и $C(l)$ для уровней $l=1,2$, построенные для тестового изображения $P1$ с использованием алгоритма PQT:

$$a - A(1); \quad \bar{b} - C(1); \quad \bar{v} - A(2); \quad \bar{z} - C(2)$$

3.2.6. Для изображений $P = \left\| p(y, x) \right\|_{(y=0, \bar{7}, x=0, \bar{7})}$, приведенных на рис. 3.35, мат-

риц аппроксимации $A(l) = \left\| a^{(l)}(y, x) \right\|_{(y=0, Y/2^l-1, x=0, X/2^l-1)}$ и кластеризации

$C(l) = \left\| c^{(l)}(y, x) \right\|_{(y=0, Y/2^l-1, x=0, X/2^l-1)}$, полученных в п. 3.2.5, сформировать матрицы

$S(l) = \left\| s^{(l)}(y, x) \right\|_{\left(\overline{y=0, Y/2^l-1}, \overline{x=0, X/2^l-1} \right)}$ сегментации, $E(l) = \left\| e^{(l)}(y, x) \right\|_{\left(\overline{y=0, Y/2^l-1}, \overline{x=0, X/2^l-1} \right)}$ границ однородных областей по алгоритму квадродерева RQT, приведенному в подразд. 2.2 (обратная кластеризация). Сравнить сформированные матрицы $S(l)$ с матрицами сегментации, полученными в п. 3.2.1.

Пример решения задачи для изображения $P1$, приведенного на рис. 3.35, a :

1) Число уровней квадродерева: $L = \log_2 Y = 3$. Пусть порядок выборки квадрантов (пикселей) изображения определяется рекурсивной Z -разверткой;

2) Инициализация:

матрицы $\{S(l)\}$ определяются нулевыми при $\overline{l=0, 3}$;

матрицы $\{E(l)\}$ определяются единичными при $\overline{l=0, 3}$;

$N_A \leftarrow 1$;

$s^{(3)}(0,0) = 0$; $e^{(3)}(0,0) = 1$.

3) $l = 3$ (рис. 3.40, $a, б$):

– формирование новых областей:

$c^{(3)}(0,0) = 1, c^{(2)}(1,1) = 0, \neg \exists (k \in [-1,1]) \neg \exists (m \in [-1,1]) (s^{(2)}(1+k, 1+m) \neq 0) \Rightarrow$
 $\Rightarrow (s^{(2)}(1,1) \leftarrow 1, N_A \leftarrow 2)$;

– пространственно-ориентированный поиск правых и нижних границ однородных областей:

$c^{(3)}(0,0) = 1, c^{(2)}(1,1) = 0 \Rightarrow e^{(2)}(1,1) \leftarrow 4$;

– слияние однородных областей не требуется.

4) $l = 2$ (рис. 3.40, $в, г$):

– формирование значений элементов матрицы $S(1)$ сегментации:

$c^{(2)}(1,1) = 0 \Rightarrow s^{(1)}(2,2) \leftarrow 1, s^{(1)}(2,3) \leftarrow 1, s^{(1)}(3,2) \leftarrow 1, s^{(1)}(3,3) \leftarrow 1$;

– формирование новых областей:

$c^{(2)}(0,0) = 1, c^{(1)}(0,1) = 0, \neg \exists (k \in [-1,1]) \neg \exists (m \in [-1,1]) (s^{(1)}(1+k, 1+m) \neq 0) \Rightarrow$
 $\Rightarrow (s^{(1)}(0,1) \leftarrow 2, N_A \leftarrow 3)$;

$c^{(2)}(0,0) = 1, c^{(1)}(1,0) = 0, \neg \exists (k \in [-1,1]) \neg \exists (m \in [-1,1]) \left(\begin{array}{l} a^{(1)}(1,0) = \\ = a^{(1)}(1+k, m) \wedge \\ \wedge s^{(1)}(1+k, m) \neq 0 \end{array} \right) \Rightarrow$

$\Rightarrow (s^{(1)}(1,0) \leftarrow 3, N_A \leftarrow 4)$;

– выраживание областей путем их присоединения к существующим однородным областям:

$$c^{(2)}(0,0)=1, c^{(1)}(1,1)=0, \left(a^{(1)}(1,1)=a^{(1)}(1,0)\right) \wedge \left(s^{(1)}(1,0) \neq 0\right) \Rightarrow s^{(1)}(1,1) \leftarrow 3;$$

$$c^{(2)}(1,0)=1, c^{(1)}(2,0)=0, \left(a^{(1)}(2,0)=a^{(1)}(1,0)\right) \wedge \left(s^{(1)}(1,0) \neq 0\right) \Rightarrow s^{(1)}(2,0) \leftarrow 3;$$

$$c^{(2)}(1,0)=1, c^{(1)}(2,1)=0, \left(a^{(1)}(2,1)=a^{(1)}(2,0)\right) \wedge \left(s^{(1)}(2,0) \neq 0\right) \Rightarrow s^{(1)}(2,1) \leftarrow 3;$$

– формирование новых областей:

$$c^{(2)}(1,0)=1, c^{(1)}(3,0)=0, \neg \exists(k \in [-1,1]) \neg \exists(m \in [-1,1]) \left(\begin{array}{l} a^{(1)}(3,0) = \\ = a^{(1)}(3+k, m) \wedge \\ \wedge s^{(1)}(3+k, m) \neq 0 \end{array} \right) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \left(s^{(1)}(3,0) \leftarrow 4, N_A \leftarrow 5 \right);$$

– выраживание областей путем их присоединения к существующим однородным областям:

$$c^{(2)}(1,0)=1, c^{(1)}(3,1)=0, \left(a^{(1)}(3,1)=a^{(1)}(3,2)\right) \wedge \left(s^{(1)}(3,2) \neq 0\right) \Rightarrow s^{(1)}(3,1) \leftarrow 1;$$

– пространственно-ориентированный поиск правых и нижних границ однородных областей:

$$c^{(2)}(0,0)=1, c^{(1)}(0,1)=0 \Rightarrow e^{(1)}(0,1) \leftarrow 4;$$

$$c^{(2)}(0,0)=1, c^{(1)}(1,0)=0 \Rightarrow e^{(1)}(1,0) \leftarrow 4;$$

$$c^{(2)}(0,0)=1, c^{(1)}(1,1)=0 \Rightarrow e^{(1)}(1,1) \leftarrow 4;$$

$$c^{(2)}(1,0)=1, c^{(1)}(2,0)=0 \Rightarrow e^{(1)}(2,0) \leftarrow 4;$$

$$c^{(2)}(1,0)=1, c^{(1)}(2,1)=0 \Rightarrow e^{(1)}(2,1) \leftarrow 4;$$

$$c^{(2)}(1,0)=1, c^{(1)}(3,0)=0 \Rightarrow e^{(1)}(3,0) \leftarrow 4;$$

$$c^{(2)}(1,0)=1, c^{(1)}(3,1)=0 \Rightarrow e^{(1)}(3,1) \leftarrow 4;$$

$$\left(e^{(2)}(1,1)=4 \right) \Rightarrow \left(e^{(1)}(2,2) \leftarrow 0, e^{(1)}(2,3) \leftarrow 11, e^{(1)}(3,2) \leftarrow 22, e^{(1)}(3,3) \leftarrow 3 \right);$$

– слияние однородных областей не требуется.

5) $l=1$ (рис. 3.40, ∂, e):

– формирование значений элементов матрицы $S(0)$ сегментации:

$$c^{(1)}(0,1)=0 \Rightarrow s^{(0)}(0,2) \leftarrow 2, s^{(0)}(0,3) \leftarrow 2, s^{(0)}(1,2) \leftarrow 2, s^{(0)}(1,3) \leftarrow 2;$$

$$c^{(1)}(1,0)=0 \Rightarrow s^{(0)}(2,0) \leftarrow 3, s^{(0)}(2,1) \leftarrow 3, s^{(0)}(3,0) \leftarrow 3, s^{(0)}(3,1) \leftarrow 3;$$

$$c^{(1)}(1,1)=0 \Rightarrow s^{(0)}(2,2) \leftarrow 3, s^{(0)}(2,3) \leftarrow 3, s^{(0)}(3,2) \leftarrow 3, s^{(0)}(3,3) \leftarrow 3;$$

$$c^{(1)}(2,0)=0 \Rightarrow s^{(0)}(4,0) \leftarrow 3, s^{(0)}(4,1) \leftarrow 3, s^{(0)}(5,0) \leftarrow 3, s^{(0)}(5,1) \leftarrow 3;$$

$$c^{(1)}(2,1)=0 \Rightarrow s^{(0)}(4,2) \leftarrow 3, s^{(0)}(4,3) \leftarrow 3, s^{(0)}(5,2) \leftarrow 3, s^{(0)}(5,3) \leftarrow 3;$$

$$c^{(1)}(3,0)=0 \Rightarrow s^{(0)}(6,0) \leftarrow 4, s^{(0)}(6,1) \leftarrow 4, s^{(0)}(7,0) \leftarrow 4, s^{(0)}(7,1) \leftarrow 4;$$

$$c^{(1)}(3,1)=0 \Rightarrow s^{(0)}(6,2) \leftarrow 1, s^{(0)}(6,3) \leftarrow 1, s^{(0)}(7,2) \leftarrow 1, s^{(0)}(7,3) \leftarrow 1;$$

$$\begin{aligned}
c^{(1)}(2,2)=0 &\Rightarrow s^{(0)}(4,4)\leftarrow 1, s^{(0)}(4,5)\leftarrow 1, s^{(0)}(5,4)\leftarrow 1, s^{(0)}(5,5)\leftarrow 1; \\
c^{(1)}(2,3)=0 &\Rightarrow s^{(0)}(4,6)\leftarrow 1, s^{(0)}(4,7)\leftarrow 1, s^{(0)}(5,6)\leftarrow 1, s^{(0)}(5,7)\leftarrow 1; \\
c^{(1)}(3,2)=0 &\Rightarrow s^{(0)}(6,4)\leftarrow 1, s^{(0)}(6,5)\leftarrow 1, s^{(0)}(7,4)\leftarrow 1, s^{(0)}(7,5)\leftarrow 1; \\
c^{(1)}(3,3)=0 &\Rightarrow s^{(0)}(6,6)\leftarrow 1, s^{(0)}(6,7)\leftarrow 1, s^{(0)}(7,6)\leftarrow 1, s^{(0)}(7,7)\leftarrow 1;
\end{aligned}$$

0	0
0	1

a

1	1
1	4

б

0	2	0	0
3	3	0	0
3	3	1	1
4	1	1	1

в

0	4	1	1
4	4	1	1
4	4	0	11
4	4	22	3

г

5	6	2	2	2	2	8	9
6	6	2	2	3	7	9	8
3	3	3	3	3	10	10	8
3	3	3	3	3	10	10	8
3	3	3	3	1	1	1	1
3	3	3	3	1	1	1	1
4	4	1	1	1	1	1	1
4	4	1	1	1	1	1	1

д

4	4	0	11	4	4	4	4
4	4	22	3	4	4	4	4
0	11	0	11	4	4	4	4
22	3	22	3	4	4	4	4
0	11	0	11	0	0	0	11
22	3	22	3	0	0	0	11
0	11	0	11	0	0	0	11
22	3	22	3	22	21	21	3

е

Рис. 3.40. Матрицы $S(l)$ и $E(l)$ для уровней $l = \overline{2,0}$, построенные для тестового изображения $P1$ с использованием алгоритма PQT:
a – $S(2)$; *б* – $E(2)$; *в* – $S(1)$; *г* – $E(1)$; *д* – $S(0)$; *е* – $E(0)$

– формирование новых областей (при инициализации алгоритма PQT $c^{(0)}(y,x) \leftarrow 0$ при $y = \overline{0, Y-1}$, $x = \overline{0, X-1}$):

$$\begin{aligned}
c^{(1)}(0,0)=1, c^{(0)}(0,0)=0, \neg\exists(k \in [-1,1])\neg\exists(m \in [-1,1])(s^{(0)}(1+k,1+m) \neq 0) &\Rightarrow \\
\Rightarrow (s^{(0)}(0,0) \leftarrow 5, N_A \leftarrow 6); &
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
c^{(1)}(0,0)=1, c^{(0)}(0,1)=0, \neg\exists(k \in [-1,1])\neg\exists(m \in [-1,1]) &\left(\begin{array}{l} a^{(0)}(0,1) = \\ = a^{(0)}(k,1+m) \wedge \\ \wedge s^{(0)}(k,1+m) \neq 0 \end{array} \right) \Rightarrow \\
\Rightarrow (s^{(0)}(0,1) \leftarrow 6, N_A \leftarrow 7); &
\end{aligned}$$

– выращивание областей путем их присоединения к существующим однородным областям:

$$c^{(1)}(0,0)=1, c^{(0)}(1,0)=0, \left(a^{(0)}(1,0)=a^{(0)}(0,1)\right) \wedge \left(s^{(0)}(0,1) \neq 0\right) \Rightarrow s^{(0)}(1,0) \leftarrow 6 ;$$

$$c^{(1)}(0,0)=1, c^{(0)}(1,1)=0, \left(a^{(0)}(1,1)=a^{(0)}(0,1)\right) \wedge \left(s^{(0)}(0,1) \neq 0\right) \Rightarrow s^{(0)}(1,1) \leftarrow 6 ;$$

$$c^{(1)}(0,2)=1, c^{(0)}(0,4)=0, \left(a^{(0)}(0,4)=a^{(0)}(0,3)\right) \wedge \left(s^{(0)}(0,3) \neq 0\right) \Rightarrow s^{(0)}(0,4) \leftarrow 2 ;$$

$$c^{(1)}(0,2)=1, c^{(0)}(0,5)=0, \left(a^{(0)}(0,5)=a^{(0)}(0,4)\right) \wedge \left(s^{(0)}(0,4) \neq 0\right) \Rightarrow s^{(0)}(0,5) \leftarrow 2 ;$$

$$c^{(1)}(0,2)=1, c^{(0)}(1,4)=0, \left(a^{(0)}(1,4)=a^{(0)}(2,3)\right) \wedge \left(s^{(0)}(2,3) \neq 0\right) \Rightarrow s^{(0)}(1,4) \leftarrow 3 ;$$

– формирование новых областей:

$$c^{(1)}(0,2)=1, c^{(0)}(1,5)=0, \neg \exists(k \in [-1,1]) \neg \exists(m \in [-1,1]) \left(\begin{array}{l} a^{(0)}(1,5) = \\ a^{(0)}(1+k, 5+m) \wedge \\ \wedge s^{(0)}(1+k, 5+m) \neq 0 \end{array} \right) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \left(s^{(0)}(1,5) \leftarrow 7, N_A \leftarrow 8\right);$$

$$c^{(1)}(0,3)=1, c^{(0)}(0,6)=0, \neg \exists(k \in [-1,1]) \neg \exists(m \in [-1,1]) \left(\begin{array}{l} a^{(0)}(0,6) = \\ a^{(0)}(k, 6+m) \wedge \\ \wedge s^{(0)}(k, 6+m) \neq 0 \end{array} \right) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \left(s^{(0)}(0,6) \leftarrow 8, N_A \leftarrow 9\right);$$

$$c^{(1)}(0,3)=1, c^{(0)}(0,7)=0, \neg \exists(k \in [-1,1]) \neg \exists(m \in [-1,1]) \left(\begin{array}{l} a^{(0)}(0,7) = \\ a^{(0)}(k, 7+m) \wedge \\ \wedge s^{(0)}(k, 7+m) \neq 0 \end{array} \right) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \left(s^{(0)}(0,7) \leftarrow 9, N_A \leftarrow 10\right);$$

– выращивание областей путем их присоединения к существующим однородным областям:

$$c^{(1)}(0,3)=1, c^{(0)}(1,6)=0, \left(a^{(0)}(1,6)=a^{(0)}(0,7)\right) \wedge \left(s^{(0)}(0,7) \neq 0\right) \Rightarrow s^{(0)}(1,6) \leftarrow 9 ;$$

$$c^{(1)}(0,3)=1, c^{(0)}(1,7)=0, \left(a^{(0)}(1,7)=a^{(0)}(0,6)\right) \wedge \left(s^{(0)}(0,6) \neq 0\right) \Rightarrow s^{(0)}(1,7) \leftarrow 8 ;$$

$$c^{(1)}(1,2)=1, c^{(0)}(2,4)=0, \left(a^{(0)}(2,4)=a^{(0)}(1,4)\right) \wedge \left(s^{(0)}(1,4) \neq 0\right) \Rightarrow s^{(0)}(2,4) \leftarrow 3 ;$$

– формирование новых областей:

$$c^{(1)}(1,2)=1, c^{(0)}(2,5)=0, \neg\exists(k \in [-1,1]) \neg\exists(m \in [-1,1]) \left(\begin{array}{l} a^{(0)}(2,5)= \\ = a^{(0)}(2+k,5+m) \wedge \\ \wedge s^{(0)}(2+k,5+m) \neq 0 \end{array} \right) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow (s^{(0)}(2,5) \leftarrow 10, N_A \leftarrow 11);$$

– выращивание областей путем их присоединения к существующим однородным областям:

$$c^{(1)}(1,2)=1, c^{(0)}(3,4)=0, (a^{(0)}(3,4)=a^{(0)}(2,4)) \wedge (s^{(0)}(2,4) \neq 0) \Rightarrow s^{(0)}(3,4) \leftarrow 3;$$

$$c^{(1)}(1,2)=1, c^{(0)}(3,5)=0, (a^{(0)}(3,5)=a^{(0)}(2,5)) \wedge (s^{(0)}(2,5) \neq 0) \Rightarrow s^{(0)}(3,5) \leftarrow 10;$$

$$c^{(1)}(1,3)=1, c^{(0)}(2,6)=0, (a^{(0)}(2,6)=a^{(0)}(2,5)) \wedge (s^{(0)}(2,5) \neq 0) \Rightarrow s^{(0)}(2,6) \leftarrow 10;$$

$$c^{(1)}(1,3)=1, c^{(0)}(2,7)=0, (a^{(0)}(2,7)=a^{(0)}(1,7)) \wedge (s^{(0)}(1,7) \neq 0) \Rightarrow s^{(0)}(2,7) \leftarrow 8;$$

$$c^{(1)}(1,3)=1, c^{(0)}(3,6)=0, (a^{(0)}(3,6)=a^{(0)}(2,6)) \wedge (s^{(0)}(2,6) \neq 0) \Rightarrow s^{(0)}(3,6) \leftarrow 10;$$

$$c^{(1)}(1,3)=1, c^{(0)}(3,7)=0, (a^{(0)}(3,7)=a^{(0)}(2,7)) \wedge (s^{(0)}(2,7) \neq 0) \Rightarrow s^{(0)}(3,7) \leftarrow 8;$$

– пространственно-ориентированный поиск правых и нижних границ однородных областей:

$$c^{(1)}(0,0)=1, c^{(0)}(0,0)=0 \Rightarrow e^{(0)}(0,0) \leftarrow 4;$$

$$c^{(1)}(0,0)=1, c^{(0)}(0,1)=0 \Rightarrow e^{(0)}(0,1) \leftarrow 4;$$

$$c^{(1)}(0,0)=1, c^{(0)}(1,0)=0 \Rightarrow e^{(0)}(1,0) \leftarrow 4;$$

$$c^{(1)}(0,0)=1, c^{(0)}(1,1)=0 \Rightarrow e^{(0)}(1,1) \leftarrow 4;$$

$$e^{(1)}(0,1)=4 \Rightarrow (e^{(0)}(0,2) \leftarrow 0, e^{(0)}(0,3) \leftarrow 11, e^{(0)}(1,2) \leftarrow 22, e^{(0)}(1,3) \leftarrow 3);$$

$$e^{(1)}(1,0)=4 \Rightarrow (e^{(0)}(2,0) \leftarrow 0, e^{(0)}(2,1) \leftarrow 11, e^{(0)}(3,0) \leftarrow 22, e^{(0)}(3,1) \leftarrow 3);$$

$$e^{(1)}(1,1)=4 \Rightarrow (e^{(0)}(2,2) \leftarrow 0, e^{(0)}(2,3) \leftarrow 11, e^{(0)}(3,2) \leftarrow 22, e^{(0)}(3,3) \leftarrow 3);$$

$$c^{(1)}(0,2)=1, c^{(0)}(0,4)=0 \Rightarrow e^{(0)}(0,4) \leftarrow 4;$$

$$c^{(1)}(0,2)=1, c^{(0)}(0,5)=0 \Rightarrow e^{(0)}(0,5) \leftarrow 4;$$

$$c^{(1)}(0,2)=1, c^{(0)}(1,4)=0 \Rightarrow e^{(0)}(1,4) \leftarrow 4;$$

$$c^{(1)}(0,2)=1, c^{(0)}(1,5)=0 \Rightarrow e^{(0)}(1,5) \leftarrow 4;$$

$$c^{(1)}(0,3)=1, c^{(0)}(0,6)=0 \Rightarrow e^{(0)}(0,6) \leftarrow 4;$$

$$c^{(1)}(0,3)=1, c^{(0)}(0,7)=0 \Rightarrow e^{(0)}(0,7) \leftarrow 4;$$

$$c^{(1)}(0,3)=1, c^{(0)}(1,6)=0 \Rightarrow e^{(0)}(1,6) \leftarrow 4;$$

$$c^{(1)}(0,3)=1, c^{(0)}(1,7)=0 \Rightarrow e^{(0)}(1,7) \leftarrow 4;$$

$$\begin{aligned}
c^{(1)}(1,2) &= 1, c^{(0)}(2,4) = 0 \Rightarrow e^{(0)}(2,4) \leftarrow 4; \\
c^{(1)}(1,2) &= 1, c^{(0)}(2,5) = 0 \Rightarrow e^{(0)}(2,5) \leftarrow 4; \\
c^{(1)}(1,2) &= 1, c^{(0)}(3,4) = 0 \Rightarrow e^{(0)}(3,4) \leftarrow 4; \\
c^{(1)}(1,2) &= 1, c^{(0)}(3,5) = 0 \Rightarrow e^{(0)}(3,5) \leftarrow 4; \\
c^{(1)}(2,2) &= 1, c^{(0)}(2,6) = 0 \Rightarrow e^{(0)}(2,6) \leftarrow 4; \\
c^{(1)}(2,2) &= 1, c^{(0)}(2,7) = 0 \Rightarrow e^{(0)}(2,7) \leftarrow 4; \\
c^{(1)}(2,2) &= 1, c^{(0)}(3,6) = 0 \Rightarrow e^{(0)}(3,6) \leftarrow 4; \\
c^{(1)}(2,2) &= 1, c^{(0)}(3,7) = 0 \Rightarrow e^{(0)}(3,7) \leftarrow 4; \\
e^{(1)}(2,0) &= 4 \Rightarrow (e^{(0)}(4,0) \leftarrow 0, e^{(0)}(4,1) \leftarrow 11, e^{(0)}(5,0) \leftarrow 22, e^{(0)}(5,1) \leftarrow 3); \\
e^{(1)}(2,1) &= 4 \Rightarrow (e^{(0)}(4,2) \leftarrow 0, e^{(0)}(4,3) \leftarrow 11, e^{(0)}(5,2) \leftarrow 22, e^{(0)}(5,3) \leftarrow 3); \\
e^{(1)}(3,0) &= 4 \Rightarrow (e^{(0)}(6,0) \leftarrow 0, e^{(0)}(6,1) \leftarrow 11, e^{(0)}(7,0) \leftarrow 22, e^{(0)}(7,1) \leftarrow 3); \\
e^{(1)}(3,1) &= 4 \Rightarrow (e^{(0)}(6,2) \leftarrow 0, e^{(0)}(6,3) \leftarrow 11, e^{(0)}(7,2) \leftarrow 22, e^{(0)}(7,3) \leftarrow 3); \\
e^{(1)}(2,2) &= 0 \Rightarrow (e^{(0)}(4,4) \leftarrow 0, e^{(0)}(4,5) \leftarrow 0, e^{(0)}(5,4) \leftarrow 0, e^{(0)}(5,5) \leftarrow 0); \\
e^{(1)}(2,3) &= 11 \Rightarrow (e^{(0)}(4,6) \leftarrow 0, e^{(0)}(4,7) \leftarrow 11, e^{(0)}(5,6) \leftarrow 0, e^{(0)}(5,7) \leftarrow 11); \\
e^{(1)}(3,2) &= 22 \Rightarrow (e^{(0)}(6,4) \leftarrow 0, e^{(0)}(6,5) \leftarrow 0, e^{(0)}(7,4) \leftarrow 22, e^{(0)}(7,5) \leftarrow 21); \\
e^{(1)}(3,3) &= 3 \Rightarrow (e^{(0)}(6,6) \leftarrow 0, e^{(0)}(6,7) \leftarrow 11, e^{(0)}(7,6) \leftarrow 21, e^{(0)}(7,7) \leftarrow 3); \\
&\text{– слияние однородных областей:} \\
e^{(1)}(0,3) &= 1, \quad (a^{(0)}(1,6) = a^{(0)}(1,5)) \wedge (s^{(0)}(1,5) \neq 0) \wedge (s^{(0)}(1,6) \neq s^{(0)}(1,5)), \\
-\exists (q \in [0, v_B(9)]) &n_B(9, q) = s^{(0)}(1,6) \Rightarrow (n_B(9,0) \leftarrow 7, v_B(9) \leftarrow 1, n_B(7,0) \leftarrow 9, v_B(7) \leftarrow 1).
\end{aligned}$$

3.2.7. Для изображений $P = \|p(y, x)\|_{(y=0,7, x=0,7)}$, приведенных на рис. 3.35, матриц $S(l) = \|s^{(l)}(y, x)\|_{(y=0, Y/2^l-1, x=0, X/2^l-1)}$ сегментации, векторов n_B и v_B , полученных в п. 3.2.6, сформировать результирующую матрицу сегментации $S_R = \|s_R(y, x)\|_{(y=0, Y-1, x=0, X-1)}$ по алгоритму квадродерева RQT, приведенному в подразд. 2.2 (уточнение границ сегментов). Сравнить сформированную матрицу S_R с матрицами сегментации $S(l)$, полученными в пп. 3.2.6 и 3.2.1.

Пример решения задачи для изображения $P1$, приведенного на рис. 3.35, a :

1) Формирование номеров изолированных однородных областей:

$$v_B(0) = 0 \Rightarrow (n_X(0,0) \leftarrow 0, n_C(0) \leftarrow 0, N_S \leftarrow 1);$$

$$v_B(1) = 0 \Rightarrow (n_X(1,0) \leftarrow 1, n_C(1) \leftarrow 1, N_S \leftarrow 2);$$

$$v_B(2) = 0 \Rightarrow (n_X(2,0) \leftarrow 2, n_C(2) \leftarrow 2, N_S \leftarrow 3);$$

$$v_B(3)=0 \Rightarrow (n_X(3,0) \leftarrow 3, n_C(3) \leftarrow 3, N_S \leftarrow 4);$$

$$v_B(4)=0 \Rightarrow (n_X(4,0) \leftarrow 4, n_C(4) \leftarrow 4, N_S \leftarrow 5);$$

$$v_B(5)=0 \Rightarrow (n_X(5,0) \leftarrow 5, n_C(5) \leftarrow 5, N_S \leftarrow 6);$$

$$v_B(6)=0 \Rightarrow (n_X(6,0) \leftarrow 6, n_C(6) \leftarrow 6, N_S \leftarrow 7);$$

$$v_B(8)=0 \Rightarrow (n_X(7,0) \leftarrow 8, n_C(8) \leftarrow 7, N_S \leftarrow 8);$$

$$v_B(10)=0 \Rightarrow (n_X(8,0) \leftarrow 10, n_C(10) \leftarrow 8, N_S \leftarrow 9).$$

2) Определение номера первой объединяемой области:

$$(n_X(9,0) \leftarrow 11), (v_X(9) \leftarrow 1), (n_C(11) \leftarrow 9).$$

3) Обработка стека:

$$n_C(1) \leftarrow 1, n_C(2) \leftarrow 2, n_C(3) \leftarrow 3, n_C(4) \leftarrow 4, n_C(5) \leftarrow 5, n_C(6) \leftarrow 6,$$

$$n_C(8) \leftarrow 8, n_C(10) \leftarrow 10;$$

$$n_C(7) \leftarrow 11, n_C(9) \leftarrow 11.$$

4) Формирование результирующей матрицы сегментации.

Результирующая матрица сегментации по алгоритму PQT приведена на рис. 3.41.

5	6	2	2	2	2	8	11
6	6	2	2	3	11	11	8
3	3	3	3	3	10	10	8
3	3	3	3	3	10	10	8
3	3	3	3	1	1	1	1
3	3	3	3	1	1	1	1
4	4	1	1	1	1	1	1
4	4	1	1	1	1	1	1

Рис. 3.41. Результирующая матрица сегментации по алгоритму PQT для изображения P1

ЛИТЕРАТУРА

1. A multi-level thresholding approach based on group search optimization algorithm and Otsu / Z. Ye [et al.] // 8th International Symposium on Computational Intelligence and Design (ISCID), Hangzhou. – 2015. – P. 275–278.
2. Haralick, R. M. Image segmentation techniques / R. M. Haralick, L. G. Shapiro // *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*. – 1985. – Vol. 29 (1). – P. 100–132.
3. Horowitz, S. L. Picture segmentation by a tree traversal algorithm / S. L. Horowitz, T. Pavlidis // *Journal of the ACM*. – 1976. – Vol. 23 (2). – P. 368–388.
4. Level set methods for watershed image segmentation / X. Tai [et al.] // *SSVM – Springer*. – 2007. – 178 p.
5. Цветков, В. Ю. Сегментация в объектно-ориентированном кодировании и передаче многокадровых изображений / В. Ю. Цветков // *Доклады БГУИР*. – 2019. – № 3 (121). – С. 25–36.
6. Richardson, I. H.264 and MPEG-4 Video Compression and Video Coding for Next-generation Multimedia / I. Richardson. – The Robert Gordon University, Aberdeen, UK, John Wiley & Sons Ltd, 2003. – 281 p.
7. Sze, V. High Efficiency Video Coding (HEVC): Algorithms and Architectures / V. Sze, M. Budagavi, G. J. Sullivan. – Springer, 2014. – 372 p.
8. Vetro, A. Overview of the stereo and multiview video coding extensions of the H.264/MPEG-4 AVC standard / A. Vetro, T. Wiegand, G. J. Sullivan // *Proc. of IEEE*. – 2011. – Vol. 99, № 4. – P. 626–642.
9. Sethuraman, S. A multiresolution framework for stereoscopic image sequence compression / S. Sethuraman, M. W. Siegel, A. G. Jordan // *Proc. of the First IEEE International Conference on Image Processing, Austin, November 1994 / IEEE Computer Society Pres.* – 1994. – Vol. 2. – P. 361–365.
10. Ellinas, J. N. Stereo image compression using wavelet coefficients morphology / J. N. Ellinas, M. S. Sangriotis // *Image and Vision Computing*. – 2004. – Vol. 22. – P. 281–290.
11. End-to-end stereoscopic video streaming with content-adaptive rate and format control / A. Aksay [et al.] // *Signal Processing: Image Communication*. – 2007. Vol. 22. – P. 157–168.
12. Zamarin, M. Lossless Compression of Stereo Disparity Maps for 3D / M. Zamarin, S. Forchhammer // *IEEE International conf. on Multimedia and Expo Workshops, IEEE Computer Society Washington, DC, USA, 2012.* – Washington, 2012. – P. 617–622.
13. Wiegand, T. Affine Multipicture Motion-Compensated Prediction / T. Wiegand, E. Steinbach, B. Girod // *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*. – February 2005. – Vol. 15, № 2. – P. 197–209.
14. Yokoyama, Y. Very low bit rate video coding using arbitrarily shaped region-based motion compensation / Y. Yokoyama, Y. Miyamoto, M. Ohta // *IEEE Trans. Circuits System Video Technology*. – December 1995. – Vol. 5, № 12. – P. 500–507.

15. Cheong, C. K. Structural motion segmentation for compact image sequence representation / C. K. Cheong [et al.] // Proc. SPIE conf. Visual Communication Image Processing, Orlando, FL, Mar, 1996. – Orlando, 1996. – Vol. 2727. – P. 1152–1163.
16. Francois, E. Coding algorithm with region-based motion compensation / E. François, J.-F. Vial, B. Chupeau // IEEE Trans. on Circuits and Systems for Video Technology. – 1997. – Vol. 7, № 1. – P. 97–108.
17. Fast and accurate global motion compensation / O. Deniza [et al.] // Pattern Recognition. – December 2011. – Vol. 44, № 12. – P. 2887–2901.
18. Diehl, N. Object-oriented motion estimation and segmentation in image sequences / N. Diehl // Signal Processing: Image Communications. – January 1991. – Vol. 3, № 1. – P. 23–56.
19. Wang, J. Y. A. Representing moving images with layers / J. Y. A. Wang, E. H. Adelson // IEEE Trans. Image Processing. – September 1994. – Vol. 3, № 9. – P. 625–638.
20. Coding of Audio-Visual Objects: Visual / ISO/IEC JTC1/SC29/WG11 N2202. – Tokyo, March 1998. – 331 p.
21. Pavlidis, Th. Integrating region growing and edge detection / Th. Pavlidis, Y. Liow // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 1990. – Vol. 12, № 3. – P. 225–233.
22. Steudel, A. Image coding with fuzzy region-growing segmentation / A. Steudel, M. Glesner // Proceedings International Conference on Image Processing, Lausanne, 19 September, 1996 / Lausanne, 1996. – P. 955–958.
23. A gradient magnitude based region growing algorithm for accurate segmentation / M. Sato [et al.] // International Conference on Image Processing, Vancouver, BC, 10–13 September, 2000. – Vancouver, 2000. – Vol. 3. – P. 448–451.
24. Chen, Y. A hybrid method of seeded region growing and region hue-area information fusion for object segmentation under patterned background / Y. Chen, Ch. Han // 10th International Conference on Information Fusion, Quebec, Canada, 9–12 July, 2007. – Quebec, 2007. – P. 1–6.
25. Xiao, R. A New Medical Segmentation Method Based on Voronoi Diagrams and Region Growing / R. Xiao, J. Wu, J. Wu // CISP '09. 2nd International Congress on Image and Signal Processing, Tianjin, 17–19 October, 2009. – Tianjin, 2009. – P. 1–4.
26. Shan, Y. A New Seeded Region Growing Algorithm for Large Object Segmentation / Y. Shan, K. Tsai, J. Wu // 4th International Conference on Biomedical Engineering and Informatics (BMEI), Shanghai, China, 15–17 October, 2011. – Shanghai, 2011. – P. 47–51.
27. Preetha, M. S. Image Segmentation Using Seeded Region Growing / M. S. Preetha, L. P. Suresh, M. J. Bosco // International Conference on Computing, Electronics and Electrical Technologies, Nagercoil, Tamil Nadu, India, 21–22 March, 2012. – Nagercoil, Tamil Nadu, 2012. – P. 576–583.
28. Jain, P. K. An Adaptive Single Seed Based Region Growing Algorithm for Color Image Segmentation / P. K. Jain, S. Susan // Annual IEEE India Conference (INDICON), Mumbai, India, 13–15 December, 2013. – Mumbai, 2013. – P. 1–6.

29. Automatic Segmentation of Crop Leaf Spot Disease Images by Integrating Local Threshold and Seeded Region Growing / J. Pang [et al.] // 2011 International Conference on Image Analysis and Signal Processing, Wuhan, Hubei, China, 21–23 October, 2011. – Hubei, 2011. – P. 590–594.

30. Lee, S. Object-Based Classification Using Region Growing Segmentation / S. Lee // IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Vancouver, BC, Canada, 24–29 July, 2011. – Vancouver, BC, 2011. – P. 621–624.

31. Best merge region-growing segmentation with integrated nonadjacent region object aggregation / J. C. Tilton [et al.] // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – November, 2012. – Vol. 50, № 11. – P. 4454–4467.

32. Tilton, J. C. Incorporating edge information into Best merge region-growing segmentation / J. C. Tilton, E. Pasolli // IGARSS 2014, Quebec, Canada, 13–18 July, 2014. – Quebec, 2014. – P. 4891–4894.

33. Li, X. An improved region growing method for segmentation / X. Li, L. Lu // International Conference on Computer Science and Service System, Nanjing, China, 11–13 August, 2012. – Nanjing, 2012. – P. 2313–2316.

34. Shi, J. Normalized Cuts and Image Segmentation / J. Shi, J. Malik // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 2000. – Vol. 22, № 8. – P. 888–905.

35. Tamilarasi, M. Genetic based fuzzy seeded region growing segmentation for diabetic retinopathy images / M. Tamilarasi, K. Duraiswamy // International Conference on Computer Communication and Informatics, Coimbatore, India, 04–06 January, 2013. – Coimbatore, 2013. – P. 1–5.

36. Gill, H. K. Automatic region growing segmentation for medical ultrasound images / H. K. Gill, A. Girdhar, J. Kaur // International Conference on Medical Imaging, m-Health and Emerging Communication Systems (MedCom), Greater Noida, India, 7–8 November, 2014. – Greater Noida, 2014. – P. 454–457.

37. A New Approach for Parallel Region Growing Algorithm in Image Segmentation using MATLAB on GPU Architecture / A. K. Sahoo [et al.] // IEEE International Conference on Computer Graphics, Vision and Information Security (CGVIS), Bhubaneswar, Odisha, India, 2–3 November, 2015. – Odisha, 2015. – P. 279–283.

38. Wu, J. A Method for sonar image segmentation based on combination of mrf and region growing / J. Wu, H. Guo // Fifth International Conference on Communication Systems and Network Technologies, Gwalior, India, 4–6 April, 2015. – Gwalior, 2015. – P. 457–460.

39. Region growing segmentation with iterative k-means for ct liver images / A. Mostafa [et al.] // 4th International Conference on Advanced Information Technology and Sensor Application, Harbin, China, 21–23 August, 2015. – Harbin, 2015. – P. 88–91.

40. Region-based classification of remote sensing images with the morphological tree of shapes / G. Cavallaro [et al.] // IGARSS. – 2016. – P. 5087–5089.

41. Chang, Y. C. Region-based fractal image compression with quadtree segmentation / Y. C. Chang, B. K. Shyu, J. S. Wang // IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, Munich, 21–24 April, 1997. – Munich, 1997. – Vol. 4. – P. 3125–3128.

42. Multiscale segmentation and anomaly enhancement of SAR imagery / C.H. Fosgate [et al.] // IEEE Transaction on image processing. – January 1997. – Vol. 6, № 1. – P. 7–20.

43. Consularo, L. A. Quadtree-based inexact graph matching for image analysis / L. A. Consularo, R. M. Cesar // Proceedings of the XVIII Brazilian Symposium on Computer Graphics and Image Processing (SIBGRAPI'05), Natal, Rio Grande do Norte, Brazil, 9–12 October, 2005. – Rio Grande do Norte, 2005. – P. 205–212.

44. Chen, L. Very Fast Region-Connected Segmentation for Spatial Data: Case Study / L. Chen, H. Zhu, W. Cui // IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, Taipei, Taiwan, 8–11 October, 2006. – Taipei, 2006. – P. 4001–4005.

45. Kelkar, D. Improved quadtree method for split merge image segmentation / D. Kelkar, S. Gupta // First International Conference on Emerging Trends in Engineering and Technology, Nagpur, Maharashtra, 16–18 July, 2008. – Nagpur, Maharashtra, 2008. – P. 44–47.

46. Yan, Y. Unsupervised color-texture image segmentation based on a new clustering method / Y. Yan, Y. Shen, Sh. Li // International Conference on New Trends in Information and Service Science, Beijing, China, 30 June – 2 July, 2009. – Beijing, 2009. – P. 784–787.

47. Дьяконова, С. В. Анализ методов сегментации спутниковых изображений / С. В. Дьяконова, Ю. П. Зайченко // Информатика, управління та обчислювальна техніка. – 2012. – № 57. – С. 118–123.

48. Pieczynski, D. V. PET/CT Image denoising and segmentation based on a multi observation and a multi scale markov tree model / D. V. Pieczynski, M. Hatt // Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (NSS/MIC), Seoul, 27 October – 2 November, 2013. – Seoul, 2013. – P. 1–4.

49. Gu, X. A Hierarchical segmentation tree for superpixel-based image segmentation / X. Gu, J. D. Deng, M. K. Purvis // International Conference on Image and Vision Computing New Zealand (IVCNZ), Palmerston North, 21–22 November, 2016. – Palmerston North, 2016. – P. 1–6.

50. Альмияхи, О. М. Сегментация изображений на основе волнового выраживания областей / О. М. Альмияхи, В. Ю. Цветков, В. К. Конопелько // Доклады БГУИР. – 2016. – № 3 (97). – С. 24–30.

51. Almiahi, O. Progressive image segmentation based on the wave region growing / O. Almiahi, V. Kanapelka // Al-Sadeq International Conference on Multi-disciplinary in IT and Communication Science and Applications (AIC-MITCSA), IEEE, Baghdad, Iraq, 9–10 May 2016. – Baghdad, 2016. – P. 105–110.

52. Альмияхи, О. М. Сегментация и компактное многомасштабное представление изображений на основе прогрессивной обратной кластеризации / О. М. Альмияхи, В. Ю. Цветков, Е. Г. Макейчик // Доклады БГУИР. – 2015. – № 6 (92). – С. 48–54.

53. Almiahi, O. M. Segmentation and compact multiscale representation of the images based on progressive backward clustering / O. M. Almiahi, V. Yu. Tsviatkou, V. K. Konopelko // Second Engineering Scientific Conference, Diyala, 16–17 December, 2015 / College of Engineering – University of Diyala. – Diyala, 2015. – P. 546–556.

Учебное издание

Цветков Виктор Юрьевич

**СЕГМЕНТАЦИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ В СИСТЕМАХ
ВИДЕОНАБЛЮДЕНИЯ**

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ

Редактор *М. А. Зайцева*

Корректор *Е. Н. Батурчик*

Компьютерная правка, оригинал-макет *В. М. Задоя*

Подписано в печать 26.01.2021. Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».
Отпечатано на ризографе. Усл. печ. л. 5,7. Уч.-изд. л. 5,8. Тираж 50 экз. Заказ 173.

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий №1/238 от 24.03.2014,
№2/113 от 07.04.2014, №3/615 от 07.04.2014.
Ул. П. Бровки, 6, 220013, г. Минск