

УДК 550.34

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ АНАЛИЗ ГЕОЛОГО-ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ ПРИ МОРФОСТРУКТУРНОМ РАЙОНИРОВАНИИ

А.И. Горшков

*Международный институт теории прогноза землетрясений
и математической геофизики Российской академии наук*

И.Н. Кандоба, Е.Л. Сафронович, И.В. Сладков

*Институт математики и механики
Уральского отделения Российской академии наук*

Исследуются вопросы автоматизации предварительного этапа морфоструктурного районирования с использованием исходной картографической, фотографической и другой информации. Процесс опирается на комплексную обработку имеющихся изображений, включает в себя алгоритмы визуализации, выделения отдельных информационно важных элементов на изображениях карт, дешифрирование фрагментов космофотоснимков. Описывается соответствующая программная реализация.

AUTOMATED IMAGE PROCESSING OF GEOLOGIC-GEOMORPHOLOGICAL INFORMATION IN MORPHOSTRUCTURAL ZONING

A.I. Gorshkov

*International Institute of Earthquake Prediction Theory
and Mathematical Geophysics, Russian Academy of Sciences*

I.N. Kandoba, E.L. Safronovitch, and I.V. Sladkov

*Institute of Mathematics and Mechanics,
Ural Division, Russian Academy of Sciences*

Computerization of preliminary steps in morphostructural zoning using topographic, tectonic and other information along with satellite photographs is discussed. The process is based on complex image data analysis including algorithms for visualization, selection of important map elements and interpretation of photographs. The relevant software is described.

ВВЕДЕНИЕ

Методика определения зон повышенной сейсмической опасности на базе использования алгоритмов математической теории распознавания образов возникла как направление вычислительной геофизики в 70-е годы и наиболее полно изложена в работах [1–3]. Распознавание мест возможного возникновения землетрясений основано на геолого-геоморфологическом определении объектов классификации и применении к ним классических алгоритмов распознавания для разделения их на два класса непересекающихся областей, в одной из которых возможны землетрясения с разной магнитудой (больше или меньше заданного порога). Основным методом выбора объектов распознавания при прогнозировании сейсмоопасных зон является морфоструктурное районирование. Оно применяется как в высокосейсмичных горных странах, так и в регионах умеренной сейсмичности. В практике геоморфологических исследований понятие *морфоструктура* используется для всей совокупности явлений, отражающих соотношение рельефа и тектонических структур. Морфоструктурное районирование предусматривает объединение объектов (морфоструктур), обладающих сходными признаками. Выделяются три основные категории морфоструктур: территориальные единицы (глыбы), линейные зоны, ограничивающие глыбы (морфоструктурные линеаменты) и места пересечения линеаментов разных простираний (морфоструктурные узлы). Именно к узлам приурочены эпицентры известных сильных землетрясений.

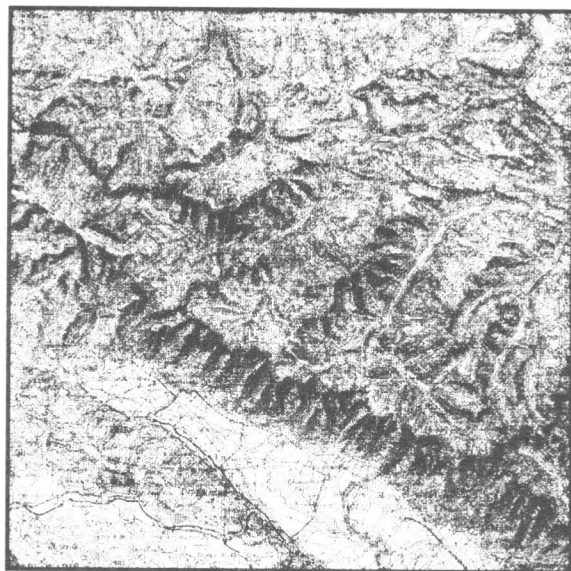
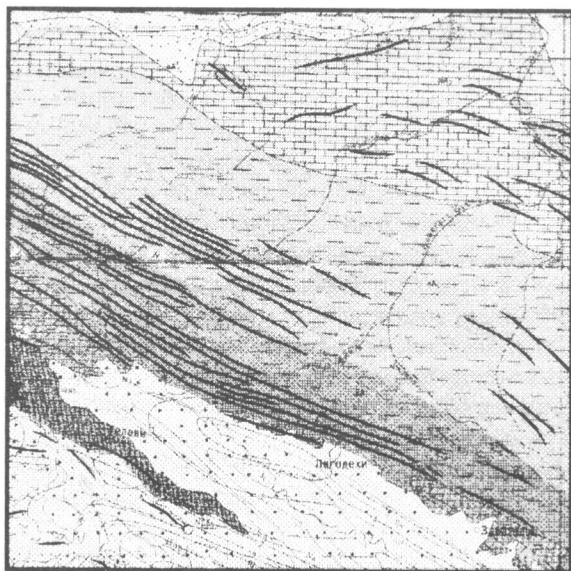
В работе [3] изложена последовательность проведения районирования, при которой на начальном этапе по картографическим материалам с использованием космofотоснимков и литературно-справочных сведений готовится предварительный вариант карты морфоструктурного районирования. Составляется орографическая схема, на которую наносится весь необходимый фактический материал: преимущественные направления гидросети, подножия, высоты и оси хребтов, отмечаются места резких и существенных изменений рельефа. Затем схема сопоставляется с геологическими и тектоническими картами, после чего определяется соотношение крупных элементов рельефа с геологическими структурами.

Работа по созданию предварительной орографической схемы проводится специалистами главным образом вручную. В настоящей статье исследуются вопросы автоматизации процесса подготовки такой схемы по исходным картографическим, фотографическим и другим данным. Процесс опирается на комплексную обработку имеющихся изображений: алгоритмы визуализации, выделение отдельных информационно важных элементов различных карт и других изображений, дешифрирование фрагментов космоснимков.

Основные типы изображений, используемые в качестве исходной информации для построения орографической схемы, представлены на рис. 1 Все изображения относятся к одному и тому же участку местности и приведены к одному масштабу.

АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ ТОПОГРАФИЧЕСКИХ, ГЕОЛОГИЧЕСКИХ И ТЕКТНИЧЕСКИХ КАРТ

При работе с топографической картой на компьютере часто бывает полезно "препарировать" отдельные объекты по одному из выбранных признаков: цвету, степени однородности текстуры, принадлежности к тому или иному диапазону высот и т.д.

a*б*

в

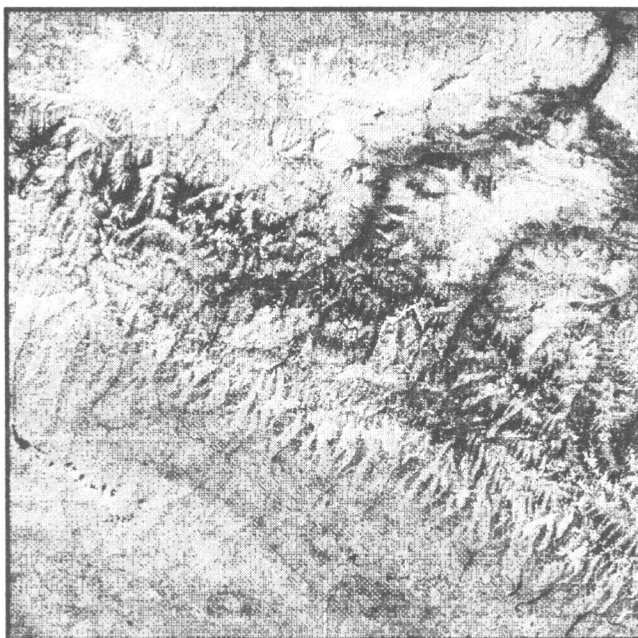


Рис. 1. Фрагменты топографической (а), тектонической (б) карты и космодотоснимка (в)

Разработанный нами алгоритм разделения основан на представлении, что различные элементы изображений могут группироваться по признакам, отражающим ряд свойств изображаемых объектов. Факт группировки элементов изображения по данному признаку проявляется в том, что в соответствующей гистограмме распределения элементов изображения вокруг некоторых значений образуются моды (кластеры). Выделив эти моды, можно найти разделяющие их границы, т.е. пороговые значения признака, по которым затем можно разделить элементы изображения на классы.

Пусть $f(k)$ – неотрицательная функция, определенная на конечном наборе идущих последовательно натуральных чисел, $k \in [1, n]$. Такая функция соответствует гистограмме – частотному распределению элементов изображения по выбранному признаку.

Выпуклой оболочкой функции f на множестве $[i, j]$ назовем функцию

$$h(k) = \max \left[f(k), \max_{p,q} \left\{ f(p) + \frac{(f(q) - f(p))(k - p)}{q - p} \right\} \right],$$

если существуют такие натуральные числа p и q , что $i \leq p \leq k$; $k \leq q \leq j$; $f(p) \neq 0$; $f(q) \neq 0$ и

$$h(k) = f(k),$$

если таких p и q нет.

Потенциалом для множества $[i, j]$ назовем функцию

$$r(i, j) = \sum_{k=i}^j (h(k) - f(k)).$$

Пусть t_1, \dots, t_{l-1} – некоторое целочисленное разбиение $[l, n]$ на l классов. Необходимость в дальнейшем разбиении m -го класса характеризуется величиной $r(t_{m-1} + 1, t_m) > 0$, где $m = 1, 2, \dots, l$, $t_0 = 0$; $t_l = n$. Тогда необходимость в дальнейшем разбиении всей области определения характеризуется следующим функционалом:

$$R_l = r(1, t_1) + r(t_1 + 1, t_2) + \dots + r(t_{l-1} + 1, n) > 0.$$

В качестве границ отдельных классов на изображении предлагается принимать точки разбиения, минимизирующие значение функционала R_l .

Если известны все $r(i, j)$, минимизация функционала R_l осуществляется с помощью метода динамического программирования: варьируется только точка t_{l-1} , поскольку имеются уже просчитанные R_{l-1} для каждого $(l-2)$ -элементного подмножества множества t_1, t_2, \dots, t_{l-1} . Таким образом, при нахождении оптимального разбиения на l классов попутно вычисляются и оптимальные разбиения на меньшее число классов.

Одно из преимуществ данного критерия – его универсальность, т.е. независимость от конкретного признака, которому соответствует рассматриваемая гистограмма.

При создании орографической схемы важное место занимают границы участков различных геологических и тектонических образований, которые можно получить при обработке соответствующих карт. Ряд методов быстрого автоматизированного выделения границ реализован на персональной ЭВМ.

Сначала на изображении выделяются точки, лежащие на границе областей с разной оптической яркостью. Для каждой точки (i, j) рассматривается ее k -окрестность и в заданных направлениях вычисляются величины перепада яркости по обе стороны от выбранного направления, каждое направление кодируется порядковым номером. В качестве характеристики точки используется номер, соответствующий направлению, в котором достигается максимальный по модулю перепад. При этом, если величина максимального перепада превосходит аналогичную величину для соседних в данном направлении точек (имеется локальный максимум), а также больше некоторого порога, то данная точка (i, j) считается граничной. Величина порога определяется либо экспериментально, либо на основе предварительной оценки содержательности изображения с учетом реализованного на нем диапазона оптических яркостей.

Далее выделенные граничные точки объединяются в связные множества – отрезки. Конечная упорядоченная последовательность граничных точек с одинаковой характеристикой-номером считается принадлежащей одному отрезку, если 1) их число превосходит минимально допустимую величину q_n , 2) расстояние между соседними точками в последовательности не превышает максимально допустимую удаленность q_r , и 3) все точки можно поместить в некоторую полосу фиксированной ширины q_h , построенную в направлении, код которого совпадает с характеристикой точек.

Пусть (i, j) – координаты анализируемой граничной точки, $n(i, j)$ – ее характеристика. Расстояние между точками (i_1, j_1) и (i_2, j_2) определим следующим образом:

$$\rho[(i_1, j_1), (i_2, j_2)] = \max[\text{abs}(i_1 - i_2), \text{abs}(j_1 - j_2)].$$

Последовательно рассматриваются все граничные точки (i, j) и выбираются такие, где выполняются пороговые ограничения

$$\rho[(i, j), (i^*, j^*)] \leq q_r, \quad n(i, j) = n(i^*, j^*).$$

Если такие (соседние) точки существуют и они не были добавлены ранее, то они объединяются с исследуемой точкой в отдельную группу. Далее процедура повторяется для соседних точек. При этом осуществляется проверка на каждом шаге условий выхода из полосы шириной q_h в направлении $n(i, j)$. В случае невозможности дальнейшего "наращивания" точек в каком-либо направлении (в оба конца), полученные точки упорядочиваются в группе и происходит анализ их общего количества. Если полученная упорядоченная последовательность удовлетворяет всем пороговым ограничениям, запоминаются координаты поставленного ей в соответствие отрезка. Таким образом изображение преобразуется из растровой формы в векторную, что используется для определения преимущественных направлений течения рек, определяющих в задаче морфоструктурного районирования возможное расположение поперечных линеаментов.

Пример результатов обработки картографических изображений дан на рис. 2. Из исходного изображения топографической карты (рис. 1, а) по гистограмме распределения значений цветов с помощью описанного выше алгоритма разделения классов выделен класс точек, соответствующих изображению гидросети (рис. 2, а). С помощью алгоритма векторизации изображение гидросети преобразовано из растровой формы в векторную (рис. 2, б). По построенному плоскому векторному полю можно следить за сменой направления течения и осуществлять поиск прерывистых линейных структур, в виде которых представляются на картах отдельные линеаменты.

Часто на предварительном этапе районирования вместе с определенным типом карты удобно использовать ее упрощенную графическую модель, которая представляет собой набор цепей (контуров), задающих очертания объектов на изображении. Каждая цепь – это ломанная, звенья которой последовательно соединяют граничные точки объекта на изображении. Помимо координат вершин, модель содержит и некоторую дополнительную информацию о каждой цепи: тип цепи – наименование или код соответствующего объекта и какие-либо его численные характеристики. Например, может быть построена графическая модель топографической карты, содержащая только линии уровня рельефа местности с информацией о значениях высот.

Для автоматизированного ввода в графическую модель контура объекта изображения реализована следующая процедура. На границе объекта последовательно указываются две эталонные вершины нового контура. Задаются размеры окрестности с центром в первой такой вершине. В ней вычисляется эталонное значение функционала R_l для вводимого контура. Такой функционал строится на основе

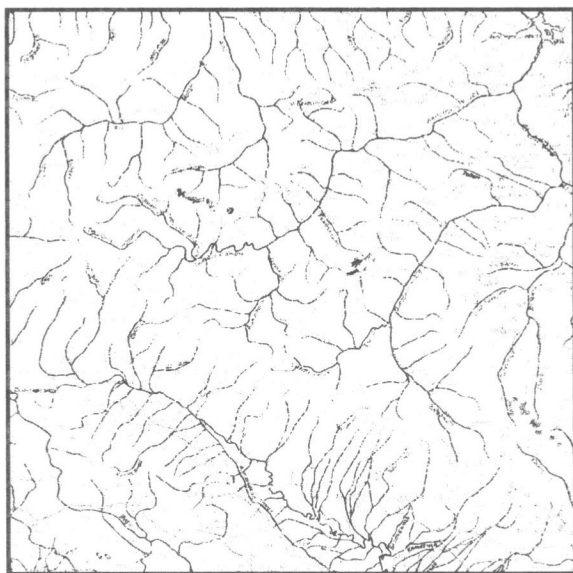
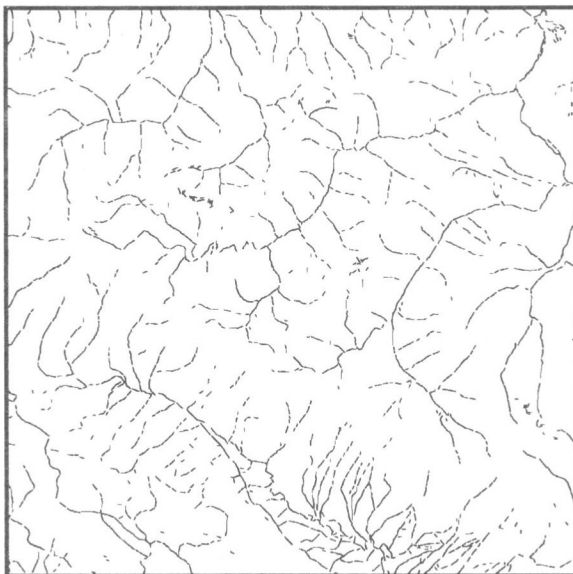
a*б*

Рис. 2. "Препарированное" изображение гидросети (растр) (*a*) и его векторная форма (*б*)

исходного набора численных характеристик границы объекта изображения. Одной из характеристик может быть максимальное значение перепада яркости при переходе через эталонную вершину по диаметру указанной окрестности. Максимум берется по всем возможным направлениям ориентации диаметра окрестности. Размер окрестности зависит от типа объекта и используемых для построения функции численных характеристик. Вторая эталонная вершина служит для определения средней величины длины звеньев цепи Δ – длины отрезка, соединяющего эталонные вершины.

В последнюю построенную вершину устанавливается отрезок длины Δ , к "подвижному" концу которого "привязывается" окрестность указанных ранее размеров. Подвижный конец отрезка поворачивается вокруг вершины, при этом в каждый момент времени для центра окрестности вычисляется значение функционала качества. В случае, когда текущее значение функционала с указанной степенью точности ε_0 совпадает с ее эталонным значением и первая эталонная вершина не принадлежит окрестности радиуса δ_0 с центром в подвижном конце отрезка, анализируемый конец отрезка принимается за очередную вершину цепи.

Если за один круг движения отрезка новая вершина не установлена, то уменьшается длина отрезка и процесс повторяется до тех пор, пока длина луча не станет меньше некоторой пороговой величины ρ . В последнем случае процедура построения контура заканчивается, и он вводится в графическую модель.

Возможна ситуация, когда несколько вершин цепи лежат практически на одной прямой, что ведет к неоправданному их накоплению в массиве вершин. Чтобы этого избежать, задается пороговое значение \varkappa_0 минимальной кривизны контура. И перед вводом новой цепи в графическую модель, из нее при необходимости удаляются вершины, кривизна контура в которых меньше \varkappa_0 .

Описанная процедура формализуется следующим образом.

Обозначим через M ограниченное замкнутое связное множество в двумерном евклидовом пространстве \mathbb{R}^2 . Определим на M некоторую функцию $F_r(X)$ (здесь r – радиус окрестности с центром в точке X).

Пусть $\{X_i(x^i, y^i)\}_{i=1}^k$ – текущая последовательность вершин вводимой цепи, $F_r^e = f_r(X_1)$ – эталонное значение функции качества,

$$\Delta = \sqrt{(x^1 - x^2)^2 + (y^1 - y^2)^2}.$$

Введем

$$X_{\alpha, \rho}(x^{\alpha, \rho}, y^{\alpha, \rho}),$$

где $x^{\alpha, \rho} = x^k + \rho \cos(\alpha)$, $y^{\alpha, \rho} = y^k + \rho \sin(\alpha)$, $\rho \in (\rho_0, \Delta]$, $\alpha \in [0, 2\pi]$.

Рассмотрим точку

$$X_{\alpha^*, \rho^*} = \arg(\min_{\alpha, \rho} |F_r(X_{\alpha, \rho}) - F_r^e|).$$

В случае, если

$$|F_r(X_{\alpha^*, \rho^*}) - F_r^e| < \varepsilon_{\dot{u}}, \quad X_1 \notin O_{\delta_0}(X_{\alpha^*, \rho^*}),$$

то за $(k + 1)$ -ю вершину вводимой цепи принимается точка X_{α^*, ρ^*} .

В k -й вершине цепи вычисляется кривизна контура κ_k . Например, κ_k может быть вычислена как величина, обратная радиусу окружности, проходящей через $(k-1)$ -ю, k -ю и $(k+1)$ -ю вершины. И если $\kappa_k < \kappa_0$, то k -я вершина цепи заменяется $(k+1)$ -й.

Процесс построения нового контура в автоматизированном режиме иллюстрирует рис. 3, на котором изображен фрагмент космофотоснимка с наложенной на него соответствующей графической схемой. На фрагменте выбирается первая эталонная вершина нового контура схемы. Здесь же определяются размеры окрестности для вычисления эталонного значения функции качества для вводимого контура.

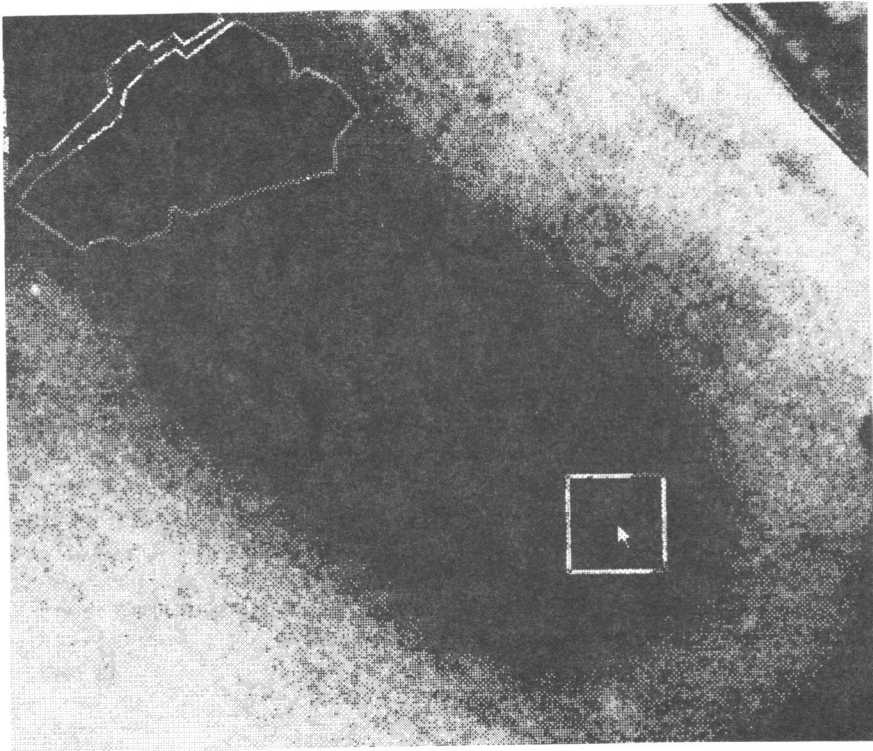


Рис. 3. Выбор первой эталонной вершины нового контура

Вычислительная процедура, соответствующая описанному алгоритму построения контурных графических моделей, реализована в системе "КОНТУР" на персональной ЭВМ. Эта система предназначена для первичной обработки изображений, построения новых и редактирования уже существующих графических моделей.

ОБРАБОТКА КОСМОФОТОСНИМКОВ

Дешифрирование космофотоснимков производится главным образом для уточнения зон поперечных линеаментов. По отобранным на снимке зонам определяется роль тех или иных элементов в современной морфоструктуре (по признакам мор-

фоструктурных линеаментов), затем они наносятся на орографическую схему. Задача автоматизации дешифрирования состоит в том, чтобы в результате сопоставления выделенного фрагмента и набора рабочих эталонов в выбранной системе признаков ЭВМ определяла с заданной степенью достоверности принадлежность изображенных на фрагменте объектов к одному из представленных классов.

На первом этапе автоматизированного распознавания происходит выбор системы аналитических дешифровочных признаков и формирование для всех классов, подлежащих распознаванию, эталонных векторов, компоненты которых соответствуют выбранным признакам. В качестве признаков используются производные функции от яркости элемента: 1) моды гистограмм распределения яркости, 2) величины максимального перепада яркостей на окнах различного размера, 3) текстурные признаки – число перепадов яркости в единице площади изображения, длина серий в различных направлениях и разность между максимальной и минимальной длиной серий [4]. За эталонные векторы классов принимаются средние векторы по всем элементам объектов на априорно подготовленных фрагментах с относительно высоким процентом визуального распознавания.

На втором этапе производится вычисление признаков по изображению анализируемого фрагмента, на основании которых проходит сопоставление фрагмента с набором машинных эталонов и происходит автоматическое разделение элементов изображения на заданное число классов. Сопоставление осуществляется по упорядоченной последовательности выделенных характеристик объектов. Поиск среди гипотез о принадлежности к классу объектов ведется либо путем минимизации подходящего "функционала", либо до достижения определенного порогового числа "срывов" (под срывом в данном случае подразумевается несовпадение характеристик текущего и эталонного фрагментов, превышающее назначенный допуск). При достижении порогового числа срывов соответствующая гипотеза отбрасывается. Гипотезы, преодолевшие пороговый барьер, упорядочиваются по выбранному количественному показателю – функционалу, оценивающему меру близости текущего и эталонных векторов. В качестве решения принимается гипотеза:

$$R = \min_j \sum_i \frac{p_i}{K_{\max}^i - K_{\min}^i + 1} \text{abs}(x_i - x_i^j).$$

Здесь j – номер класса, i – номер характеристики, $K_{\max}^i - K_{\min}^i$ – диапазон изменения i -й характеристики, x_i – значение i -й характеристики в исследуемой точке, x_i^j – значение i -й характеристики для j -го класса, p_i – вес i -й характеристики, отвечающий за срывы.

После того как все характеристические векторы элементов отнесены к классам, по ним вычисляются новые средние векторы классов методом усреднения векторов одного класса по числу классифицированных элементов. Описанная процедура продолжается до тех пор, пока все номера классов, которые присваиваются каждому вектору, не перестанут изменяться, либо пока значения компонент средних векторов классов будут мало изменяться по сравнению с предыдущим шагом.

Отметим, что первоначальные средние векторы характеристик для классов задаются или произвольно или исходя из априорных сведений об изображении. Однако от расположения этих векторов зависит скорость сходимости алгоритма, т.е. число необходимых итераций.

На третьем этапе работы алгоритма осуществляется разбиение всех выделенных классов на отдельные "объекты" (под объектом в данном случае понимается односвязное множество элементов одного класса). Алгоритм разделения объектов работает непосредственно с двухцветной рабочей областью на экране (первый цвет соответствует "препарированным" точкам, второй – фону). Процедура осуществляет сканирование изображений по горизонтали или вертикали и поиск точек, принадлежащих объектам. Каждая из найденных несвязных серий окрашивается в свой цвет. Далее происходит присоединение точек последующего ряда или колонки, при этом

- если точечный элемент не имеет окрашенных соседей, то он окрашивается в новый цвет;
- если есть окрашенные соседи и они окрашены в один и тот же цвет, то анализируемый элемент окрашивается в этот цвет;
- если же у соседей более одного цвета окраски, происходит "отождествление" цветов и все ранее окрашенные в эти цвета точки перекрашиваются в любой из найденных, другой (или другие) цвет при этом вновь становится свободным.

Критерием завершения выделения односвязной области является отсутствие точек данного цвета в очередном сканируемом ряде или колонке.

На четвертом этапе алгоритм осуществляет автоматическое дешифрирование выделенных на предыдущем этапе объектов. Результатом дешифрирования считается тот класс топографических объектов, эталонный вектор которого наиболее близок к среднему вектору по всем точкам классифицированного объекта. В качестве критерия близости используется критерий типа классификационного, где вместо средних векторов классов подставляются эталонные векторы, а вместо характеристического вектора элемента используется вектор, усредненный по всем точкам рассматриваемого объекта.

Результаты обработки изображений космофотоснимков дают важную дополнительную информацию о структурах рельефа, которую можно использовать при районировании территорий.

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС "МОСТ"

Вычислительные процедуры, соответствующие рассматриваемым в статье алгоритмам, положены в основу специального программного комплекса "МОСТ" для автоматизированной обработки исходной геолого-геоморфологической информации при морфоструктурном районировании. Предполагается, что аппаратная часть включает в себя два устройства для ввода графической информации: цветной сканер и дигитайзер. Программная часть реализована в среде Microsoft Windows 95 и состоит из шести основных блоков:

1. Оболочка комплекса, осуществляющая стыковку всех блоков системы при помощи иерархического меню, ввод, вывод и визуализацию информации и результатов обработки в растровом и векторном видах.
2. Блок предварительной обработки изображений, осуществляющий привязку изображения к базовой системе координат; стыковку отдельных фрагментов изображений из разных файлов; выделение участков, подлежащих дальнейшей обработке; согласование (наложение, масштабирование, взаимная ориентация) кар-

тографической информации разного вида (топографических, геологических, тектонических и других данных), относящейся к одному и тому же участку земной поверхности.

3. Блок препарирования и фильтрации, в котором реализованы алгоритмы выделения элементов изображения, удовлетворяющих заданным условиям (цвет, текстура и т.п.) и алгоритмы обнаружения границ отдельных объектов.

4. Блок интерактивной корректировки обработанных в автоматическом режиме изображений и исходных данных. Блок дешифрирования объектов на изображении, измерения их количественных характеристик и формирования отдельных слоев орографической схемы.

5. Блок справочной информации, содержащий общие сведения об аппаратно-программном комплексе и инструкции пользователям.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования показали, что содержание работы по созданию орографической схемы географического района позволяет применить ряд математических формализаций, позволяющих автоматизировать данный этап морфоструктурного районирования. Объединенными в единый программный комплекс алгоритмами автоматической обработки изображений удобно пользоваться на начальном этапе работы с целью поиска и построения морфоструктурных линейных элементов. Кроме того, разработанный математический инструментальный может быть использован также для мониторинга природных явлений, получения статистических данных, картографирования местности и т.п.

Предлагаемая методика апробировалась на отдельных районах Большого Кавказа. При моделировании процесса построения орографической схемы были выделены преимущественные направления речной сети, осевые линии и подножия горных хребтов, прямолинейные участки разломов.

Работа выполнена при поддержке Международного научно-технического центра (грант 008/94).

ЛИТЕРАТУРА

1. Гельфанд И.М., Губерман Ш.А., Извекова М.Л. и др. О критериях высокой сейсмичности // ДАН СССР. 1972. Т. 202, № 6. С.1317-1320.
2. Гвишиани А.Д., Гурвич В.А., Расцветаев А.Л. Оценка сейсмической раздробленности методом распознавания образов // Математические методы в сейсмологии и геодинамике. (Вычисл. сейсмология. Вып. 19). М.: Наука, 1986. С.70-77.
3. Гвишиани А.Д., Горшков А.И., Ранцман Е.Я., Систернас А., Соловьев А.А. Прогнозирование мест землетрясений в регионах умеренной сейсмичности. М.: Наука, 1988. 176 с.
4. Сафронович Е.Л. Об автоматизации процесса дешифрирования объектов на космодетективах. Материалы II Всероссийской с участием стран СНГ конференции "Распознавание образов и анализ изображений. Новые информационные технологии". Ч. 3. Ульяновск. 1995. С.169-171.