УДК 550.83

И.Б.МОВЧАН, А.А.ЯКОВЛЕВА
Санкт-Петербургский государственный горный институт (*технический университет*), *Россия*

МЕТОД СТРУКТУРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКОГО ПРОГНОЗА ПРИ ОБРАБОТКЕ КОСМОСНИМКОВ В ЗАДАЧЕ ОПТИМИЗАЦИИ ПОИСКА МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Основу метода составляет автоматизированное линеаментное дешифрирование полутонового поля яркости спектрозональных космоснимков, которое опирается на процедуры поиска экстремумов, вращения и генерализации по угловым и дисперсионным критериям. Результат представлен структурно-тектоническими картами разной степени генерализации. Эти карты подлежат дополнительной обработке при поисках факторов структурного контроля рудных объектов разного ранга. Ведущие критерии здесь представлены периодичностью, участками дискордантных пересечений, особыми точками на ветвях лог-нормальных спиральных образований. Такой подход допускает как эталонный, так и безэталонный прогноз на начальных стадиях геолого-геофизических оценок лицензионных площадей.

The method is based on the formal lineament decoding the half-tone field of brightness of multispectral satellite slides. It includes the procedures of point of extremum tracing, rotation and generalization with using angular and dispersion criteria. The result is the set of structure-tectonic maps of different level of generalization. These maps are additionally processed for discovering the factors of structural control of ore objects of different ranges. Here the leading criteria are the periodicity, the areas of discordant relationship, and the singularities on the branches of logarithmic spirals. Such approach admits the forecast implementation with the information about reference objects and without this one.

Введение. Космоснимки (КС) представляют собой наиболее проблемный и вместе с тем весьма перспективный материал дистанционного мониторинга состояния геологической среды и экосистем. Проблемный характер КС связан с проектированием в одну плоскость космоизображения часто неразделимых образов эндо- и экзогенных объектов. Перспективность космического мониторинга определяется следующими факторами: единовременным захватом значительных площадей при независимых регистрациях в нескольких спектральных каналах; замерами с регулярным временным шагом и высокой пространственной разрешающей способностью. Указанная двойственность определила наш выбор экспериментального материала.

Одна из основных задач, решаемых при выявлении закономерностей в структуре КС, состоит в определении факторов структурного контроля эндо- и экзогенных месторождений полезных ископаемых, что ранее выполнялось на основе двух подходов:

- распознавания образов с обучением (построение линейных дискриминантных функций);
- линеаментного анализа космообраза (визуальная обработка и личный опыт дешифровщика).

Цель настоящей работы – создание семейства алгоритмизируемых критериев, применимых как к структурной обработке космоснимка, так и к распознаванию образов. Эта цель определила такие задачи, как предельная формализация линеаментного дешифрирования и использование его результатов при дальнейшем структурном прогнозе. Для объединения линеаментного анализа и распознавания образов существует два основания:

- линеаризованный элемент ландшафта представляет собой структурный образ, аде-

кватно воспринимаемый большинством геологов и геоморфологов;

• традиционное распознавание образов опирается на линейные статистические критерии, корректные в условиях стационарной эмпирической выборки. Поскольку для поля оптической плотности КС стационарность может рассматриваться как идеализация, то необходима разработка нелинейных структурных критериев прогноза.

Выявление контролирующих рудопроявления структурных особенностей возможно лишь при наличии структурно-тектонических схем, обеспечиваемых авторской методикой линеаментно-спектрального анализа (ЛНС).

Линеаментно-спектральный анализ. Главная процедура ЛНС представлена выделением линеаментных структур, которое начинается с локализации в полутоновом поле яркости КС или в поле значений абсолютных высот дневного рельефа областей максимальных (минимальных) значений, а также зон максимального пространственного градиента. В этих областях и зонах выделяются точки экстремума, с которыми совмещается центр элементарного отрезка длиной 5 пикселов в масштабе дистанционной космосъемки. Начальное положение элементарного отрезка с центром в точке экстремума алгоритмически определено как субмеридиональное, относительно которого отрезок поворачивается вокруг точки экстремума с постоянным угловым шагом в 1°, пока угол между текущим положением отрезка и его начальной ориентацией не составит 180°. При этом для каждой позиции поворачиваемого отрезка вдоль его линии отбираются пять значений полутонового поля КС с шагом, определяемым масштабом съемки. Для данного угла поворота α по пяти отобранным значениям рассчитываем дисперсию и после завершения вращения отрезка строим график зависимости этой дисперсии от угла поворота. В случае, когда отрезок ориентирован по оси протяженной возвышенности, впадины или градиентной зоны, дисперсия должна быть минимальной. Определив, какой угол α соответствует минимуму дисперсии, достаточно повернуть отрезок на этот угол относительно его начального (субмеридионального) простирания, чтобы задать оптимальную ориентацию элементарного отрезка. Процедура отбора точек экстремумов, вращения элементарных отрезков и определения их оптимального простирания захватывает всю площадь, отображенную на дистанционном фотоснимке. Конечный результат представлен структурной схемой, которая без дополнительной обработки имела бы вид разрозненных отрезков, требующих дополнительного визуального обобщения (рис.1, *а*). Для оценки структурных закономерностей в поле элементарных линеаментов, характеризуемом значительным статистическим разбросом,

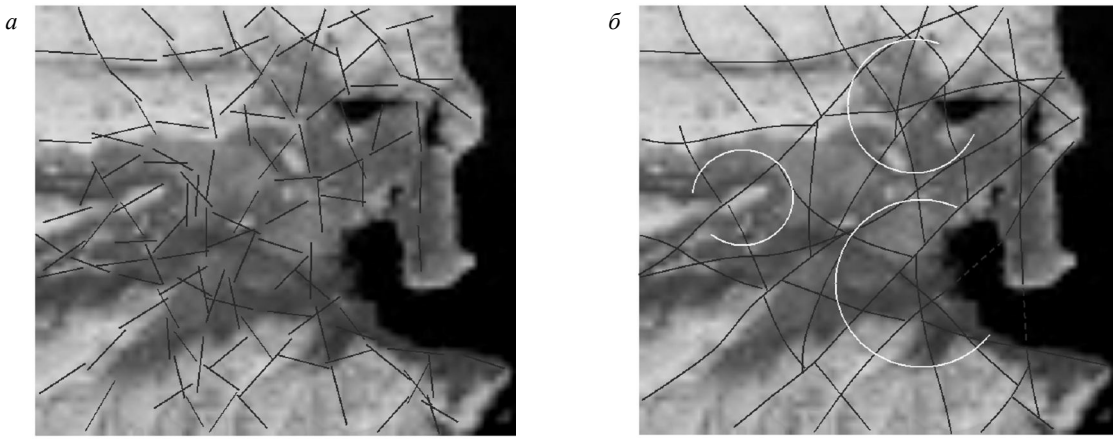


Рис.1. Структурное дешифрирование КС на грани разрешающей способности по территории месторождения Тулийок: *а* – автоматизированное линеаментное картирование с использованием эталонного образа отрезка; *б* – структурная генерализация карты (*а*) на основе угловых критериев

нами разработан способ генерализации (рис.1, *б*). Теоретически он может опираться на два независимых подхода:

1) амплитудно-частотную фильтрацию исходного космоснимка на три условно независимые составляющие: низко-, средне- и высокочастотную;

2) априорное задание предельной длины картируемой протяженной структуры или радиуса выделяемой кольцевой структуры.

На практике оба подхода дублируют друг друга. Формально первой процедурой в схеме генерализации выступает расчет автокорреляционной функции полутонового поля исходного КС. Согласно [2, 6], существует узкий класс параметров, которые позволяют аналитически описать структуру автокорреляционной функции. Последняя отражает как наличие образований с детерминированным пространственным шагом, простирание этих образований, так и средний по полигону линейный размер. На основании этих параметров (пространственного периода и линейного размера структур) строится семейство передаточных функций амплитудно-частотного фильтра, итерационное применение которых в предметной плоскости дает оптимальное частотное разделение обрабатываемого скалярного поля (здесь – полутонового поля значений яркости КС). Выделив из исходного КС его низко-, средне- и высокочастотные компоненты, мы снова рассчитываем для каждой из этих компонент автокорреляционную функцию. Структурно она симметрична относительно своего центрального максимума, средний радиус которого определяет средний по полигону линейный размер геоструктур. Именно значения этого параметра приняты нами за предельную длину картируемой протяженной структуры и радиус кольцевых структур данного порядка. Как только эти величины заданы, возникает алгоритмическая основа для соединения элементарных отрезков с выполнением так называемых угловых критериев. Например, в случае, когда ансамбль элементарных отрезков принадлежит линеаризуемой структуре, при объединении этих отрезков допускаются угловые отклонения ±10° от среднестатистических направлений, определяемых по карте изолиний автокорреляционных функций. Подобный угловой критерий применяется для объединения элементарных отрезков в кольцевую структуру.

В программной реализации структурное дешифрирование КС, совмещенное с процедурой генерализации, предполагает следующую последовательность операций:

- амплитудно-частотное разделение полутонового поля на компоненты;
- вычисление для низко-, средне- и высокочастотной компонент собственной автокорреляционной функции;
- восстановление по каждой из этих функций роз-диаграммы и линейного размера картируемых протяженных и кольцевых структур;
- расчет для каждой из компонент полутонового поля космоснимка схемы элементарных отрезков с их последующей генерализацией в протяженные и кольцевые структуры.

Основной итог такого структурного дешифрирования имеет вид комплекта разного уровня генерализации карт линейных и кольцевых геоморфологических элементов (рис.2). Учитывая определение линеамента как линеаризованной формы ландшафта, отражающей геологическую трещиноватость, испытавшую новейшую активизацию, эти карты в первом приближении можно назвать структурно-тектоническими. В нашей методике они не считаются конечным результатом, но представляют лишь сырье для выявления факторов структурного контроля месторождений.

Методика трассирования структурных закономерностей. Разработка данной методики связана с наличием в производственных проектах прогнозных задач, где следует учитывать возможность наличия и отсутствия эталонного объекта.

Начнем рассмотрение с безэталонного прогнозирования как наиболее частого в практике случая. В этом направлении нами созданы два алгоритма, один из которых ориентирован на выявление изолированных структурных объектов, а другой – на применение гидродинамической аналогии. Пер-

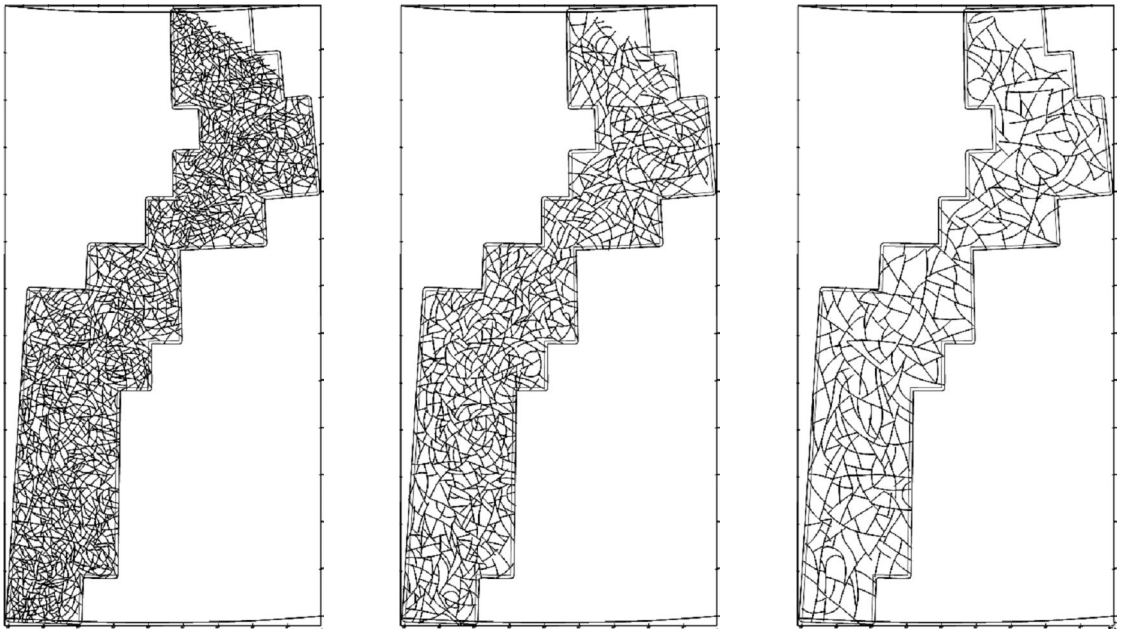


Рис.2. Дешифрирование структуры Урала на разных уровнях генерализации

вый алгоритм опирается на концепцию Т.А.Милая и В.К.Орлова [1] о рудоконтролирующей роли дискордантных структур, а также общие соображения о контролирующей роли узлов пересечений региональных дизъюнктивных зон. Формализация этих представлений свелась к выделению сгущений в ансамбле протяженных структур заданного простирания и получению изображения наложенных разноглубинных структурных планов с определением участка их дискордантного пересечения. Для разбраковки таких участков считаем, что область дискордантного пересечения наложенных структурных планов перспективна, если она пространственно совпадает с кольцевой структурой или их семейством. Второй алгоритм опирается на концепцию О.В.Петрова [4, 5] о поведении геологической среды как вязкой жидкости в масштабах геохронологической шкалы. Находясь в состоянии нарушения плотностного равновесия, эта жидкость образует в своем объеме диссипативные структуры, частным случаем которых выступают спиральные волны. Их локализация на площади основана на выделении вложенных и близких к концентрическим структур центрального типа, дуги которых рассматриваются здесь как ветви одной логнормальной спирали, задаваемой функцией вида $r = \pm\exp(\sqrt{\varphi}),\quad \varphi \in [0,2\pi]$. Спиральные волны не являются самостоятельными образованиями: наши гидродинамические эксперименты показывают, что они возникают в условиях нарастания плотностного неравновесия в лабораторной системе и связанной с этим нарастанием трансформации диссипативного ячеистого структурирования объема неравновесных жидких сред. На фронте спиральной волны появляются особые точки, в которых резко может изменяться структура течения потока жидкости и которые могут рассматриваться как аномальные. При наличии некоторых площадных данных мониторинга (например, космической спектрозональной съемки) аномальные точки на фронте лог-нормальной спиральной волны выявляются по областям наибольшей изменчивости обрабатываемого скалярного поля. Оказывается возможным прогнозировать тип аномального геологического объекта, попадающего в область отмеченной выше узловой точки: как показывает эмпирический опыт, эффективным критерием такого прогноза служит радиус ветви логнормальной спирали (рис.3).

Алгоритм эталонного структурного прогноза ориентирован на концепцию соосных геологических структур (Л.И.Красный,

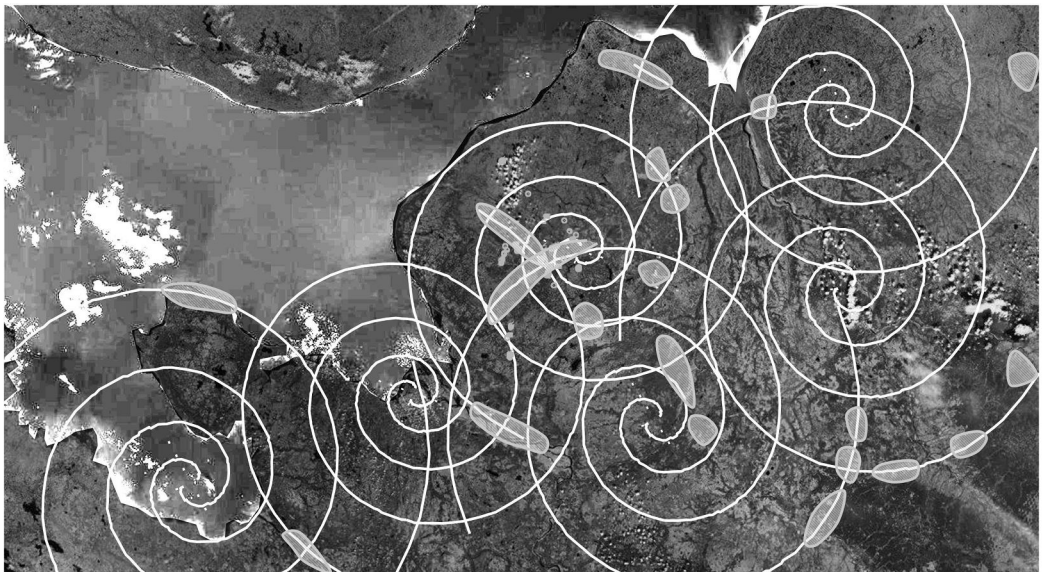


Рис.3. Распознавание образцов без обучения по спекторозональному космоснимку севера Архангельской области
Белые пятна – спиральные палетки. Вытянутые контуры маркируют дисперсионные аномалии, соответствующие прогнозным радиусам кривизны веток спиралей. Светлые точки в центре КС – эталонные объекты, взятые для иллюстрации эффективности методики

Т.А.Милай и др.), согласно которой в семействе близких по генезису аномальных геологических объектов проявляется средний пространственный шаг вдоль некоторой пространственной оси. Последняя не обязательно совпадает с элементами регматической решетки планетарной трещиноватости, например, в случае последовательных проявлений следа так называемой горячей точки. Как и в случае безэталонного прогноза мы считаем, что отдельный аномальный объект приурочен к локальному участку дискордантного пересечения разновозрастных и разноглубинных структурных планов, маркирующийся семейством концентрических разломов. Ярким ее примером выступает структура центрального типа, образующаяся в области развития пегматитового штокверка, что обусловлено поэтапным просаживанием участков верхней части разреза при последовательном замещении вещественного состава вмещающих осадочных или вулканогенно-осадочных комплексов. Дополнение к этим признакам критериев пространственного периода и пространственной оси позволяет при наличии двух и более эталонных объектов выполнить экстраполяцию и указать перспективные участки для доразведки месторождений в пределах заявленных Заказчиком лицензионных площадей.

В результате проведенных исследований разработана система формальных критериев дешифрирования (структурного анализа) спектрозональных космоснимков. На ее основе создана апробированная технология поиска факторов структурного контроля рудных объектов разного ранга. Здесь авторские алгоритмы генерируют карты, каждая из которых отличается своим уровнем генерализации и содержит кольцевые и линейные структуры определенного ранга, образующие неразрывный структурный каркас полигона. На основе таких структурно-тектонических карт выполняется программными средствами эталонный и безэталонный прогноз, в котором выделяются дискордантные, циркоидные, спиральные, периодичные и соосные объекты.

ЛИТЕРАТУРА

1. Интерпретация геофизических материалов при обнаружении глубинных дискордантных структур, контролирующих рудные формации и магматизм мантийного генезиса / В.К.Орлов, Т.А.Милай, И.Б.Мовчан и др. //

Труды Межд. конф. «Геофизика и современный мир». М., 1994. С.154-155.

2. *Марпл С.Л.* Цифровой спектральный анализ и его приложения. М.: Мир, 1990. 584 с.

3. *Мовчан И.Б.* Прикладные аспекты теории диссипативного структурирования неравновесной геологической среды // Диссипативные структуры Земли. СПб, 2007. С.202-268.

4. *Петров О.В.* Внутренние гравитационные волны Земли и нелинейные палеогеодинамические диссипативные структуры // Докл. РАН. 1992. Т.326. № 2. С.323-326.

5. *Петров О.В.* Нелинейные явления термогравитационной неустойчивости и внутренние гравитационные волны Земли // Докл. РАН. 1992. Т.326. № 3. С.506-509.

6. *Серкеров С.А.* Спектральный анализ в гравиразведке и магниторазведке. М.: Мир, 1991. 279 с.