УДК 550.8.01:504.55:528.77

И.Б.МОВЧАН, *канд. геол.-минерал. наук, доцент, Imovch@mail.ru*
А.А.ЯКОВЛЕВА, *канд. физ.-мат. наук, доцент, Sherlock@inbox.ru*
В.Ю.АСЯНИНА, *аспирант, asyanina.v@yandex.ru*
Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург

I.B.MOVCHAN, *PhD in geol. & min. sc., associate professor, Imovch@mail.ru*
A.A.YAKOVLEVA, *PhD in phys. & math. sc., associate professor, Sherlock@inbox.ru*
V.Yu.ASYANINA, *post-graduate student, asyanina.v@yandex.ru*
National Mineral Resources University (Mining University), Saint Petersburg

МЕТОД ОПЕРЕЖАЮЩЕГО ПРОГНОЗА В ЗАДАЧЕ СНИЖЕНИЯ НАГРУЗКИ НА ЛАНДШАФТ ПРИ ПЛАНИРОВАНИИ ДЕТАЛИЗАЦИОННЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ И ЭКОЛОГИЧЕСКИХ РАБОТ

Основу метода составляет автоматизированное линеаментное дешифрирование полутонового поля яркости спектрозональных космоснимков. Оно 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 представлены периодичностью, участками дискордантных пересечений, особыми точками на ветвях логнормальных спиральных образований. Такой подход допускает как эталонный, так и безэталонный прогноз на начальных стадиях геолого-геофизических оценок лицензионных площадей.

***Ключевые слова*:** прогноз, мониторинг, космоснимки, линеамент, дешифрирование.

PRIMARY FORECASTING METHOD IN THE PROBLEM OF REDUCING LOADS ON LANDSCAPE UNDER PLANNING LARGE-SCALE GEOLOGICAL AND ECOLOGICAL SURVEYS

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.

***Key words*:** prediction, monitoring, satellite imagery, lineament, decoding.

Космоснимки (КС) представляют собой наиболее проблемный и наиболее перспективный материал дистанционного мониторинга состояния геологической среды и экосистем. Отмеченный проблемный характер связан с двумя факторами:

• поле оптической плотности КС является непотенциальным, т.е. с позиций традиционных методов матфизики не подлежит количественной интерпретации;

• в одну плоскость космоизображения проектируются часто неразделимые образы

эндо- и экзогенных объектов, что затрудняет даже качественную интерпретацию структуры КС.

Перспективность космического мониторинга можно связать с двумя факторами:

• единовременный захват значительных площадей при независимых регистрациях в нескольких спектральных каналах;

• мониторинг с регулярным временным шагом и высокой пространственной разрешающей способностью.

Одна из основных задач, решаемых при выявлении закономерностей в структуре КС, состоит в выявлении факторов структурного контроля месторождений полезных ископаемых эндо- и экзогенного происхождения. Ее решение касается не только геологического прогноза на первичном этапе геолого-геофизических оценок перспективности заявленных полигонов, но и промышленной экологии в рамках управления охраной окружающей среды. С последним аспектом связана возможность оптимизации постановки детальных геолого-геофизических работ при разведке и доразведке месторождений в результате критериальной минимизации перспективных площадей. Следовательно, имеет место локализация вторичных геохимических ореолов рассеяния, минимизация воздействий на разные компоненты экосистем. Выявление факторов структурного контроля возможно лишь при наличии структурно-тектонических схем, обеспечиваемых авторской методикой линеаментно-структурной реконструкции.

Главная процедура автоматизированной линеаментно-структурной реконструкции представлена выделением линеаментных структур, которое начинается с локализации в поле отраженного от дневной поверхности света 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, т.е. линеаризованной протяженной структуры, длина которой составляет 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. Зная, какой угол α соответствует минимуму дисперсии, достаточно повернуть отрезок на этот угол относительно его начального, субмеридионального, простирания, чтобы задать оптимальную ориентацию элементарного отрезка.

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

• амплитудно-частотную фильтрацию исходного космоснимка на три условно независимые составляющие: низко-, средне- и высокочастотную. Теоретически полутоновое изображение на исходном космоснимке представляет суперпозицию этих трех составляющих;

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

На практике оба подхода дублируют друг друга.

В случае, когда ансамбль элементарных отрезков принадлежит линеаризуемой структуре, при объединении этих отрезков допускаются угловые отклонения $\pm 10°$ от среднестатистических направлений, опреде-

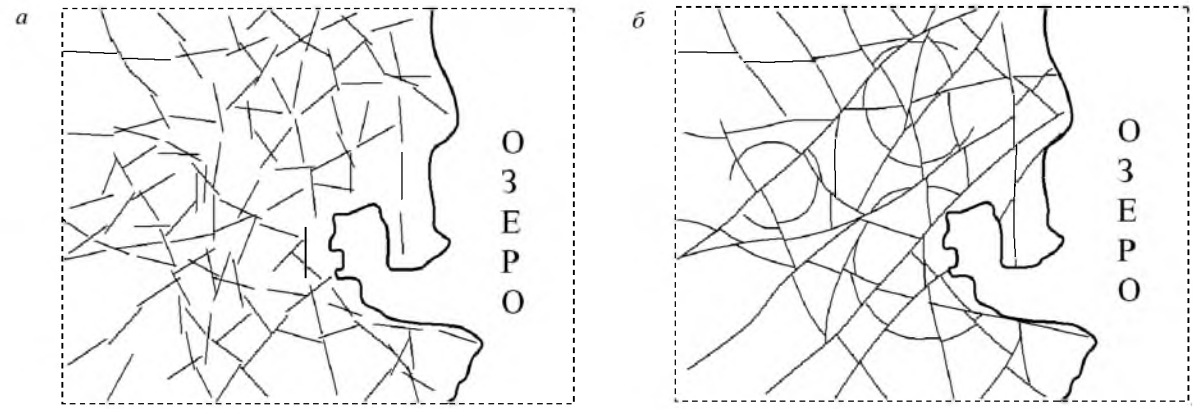


Рис.1. Структурное дешифрирование КС на грани разрешающей способности по территории месторождения Тулийок: *а* – автоматизированное линеаментное картирование с использованием эталонного образа отрезка; *б* – структурная генерализация карты на основе угловых критериев

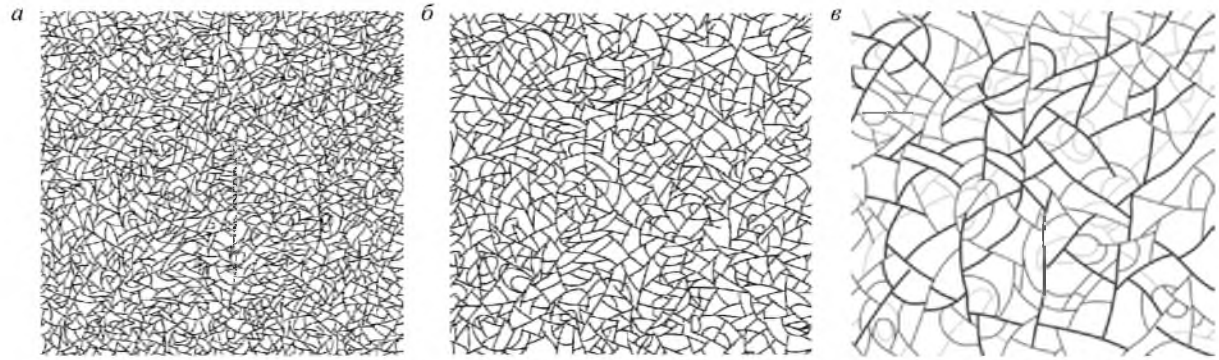


Рис.2. Дешифрирование в пределах листа L-53 на разных уровнях генерализации

ляемых по карте изолиний автокорреляционных функций. При объединении элементарных отрезков в кольцевую структуру с детерминированным радиусом сопоставляется азимут элементарного отрезка и азимут элемента дуги гипотетического кольца. В случае заполнения элементарными отрезками дуги этого кольца более чем на 50 %, при угловых отклонениях каждого отрезка от соответствующего элемента дуги ±5° принимается решение о наличии в данной области кольцевой структуры.

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

• амплитудно-частотная фильтрация полутонового поля КС с использованием семейства передаточных функций, построенных по автокорреляционной функции исходного космоснимка [4];

• вычисление для низко-, средне- и высокочастотной компонент полутонового поля КС 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.

Этим достигается не только обобщение отдельной схемы элементарных отрезков в линеаризованные и кольцевые структуры с закономерным пространственным соотношением (рис.1) [1]. Основной итог такого структурного дешифрирования имеет вид комплекта разного уровня генерализации карт линейных и кольцевых геоморфологических элементов (рис.2).

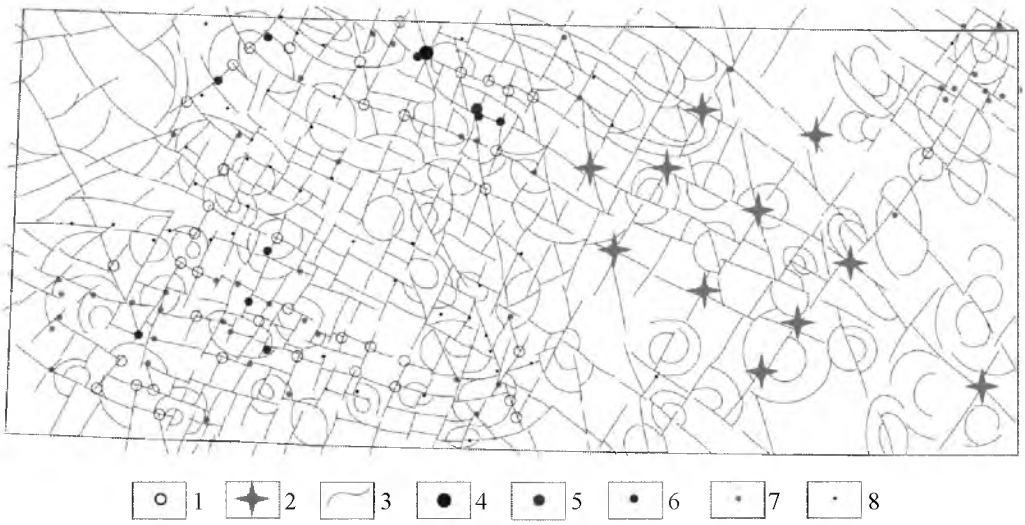


Рис. 3. Результат подбора нелинейной квазипериодической линеаментной сетки с разбиением множества эталонных объектов на локальные периодические группы. По среднему пространственному шагу в пределах каждой группы или на ее оси выполняются выделения прогнозных объектов

1 – прогнозные объекты в области существования объектов эталонных (рудных месторождений и рудопроявлений золота); 2 – прогнозные объекты за пределами области существования эталонных объектов 3 – линеаментные структуры; 4-8 – рудные месторождения и рудопроявлений золота разного ранга

Среди структурных закономерностей можно выделить параметризацию и прогнозную значимость. Базовым здесь можно считать безэталонное прогнозирование из-за необходимости скрыть коммерческую тайну. В этом направлении в рамках представленного проекта создано два авторских алгоритма, один из которых ориентирован на выявление изолированных структурных объектов, а другой – на применение гидродинамической аналогии.

Первый алгоритм опирается на концепцию Т.А.Милая и В.К.Орлова [2] о рудоконтролирующей роли дискордантных структур. 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 (рис.3). Если принимать во внимание все такие участки, то территория, характеризуемая нами, как перспективная на аномальное геологическое событие (рудное тело, месторождение, поле, провинция), может захватывать до 30-40 % площади полигона. Считаем область дискордантного пересечения наложенных структурных планов перспективной, если она пространственно совпадает с кольцевой структурой или их семейством. Критерий апробирован в пределах Прибайкалья при прогнозе эндогенных месторождений золота.

Второй алгоритм опирается на концепцию О.В.Петрова [3] 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:

$$r = \pm\exp\left(\sqrt{\varphi}\right),\ \varphi \in [0,2\pi].$$

Спиральные волны не являются самостоятельными образованиями: по мнению А.В.Оганезова (1997), в силу неравномерного развития в области генерации этой волны деформационно-разрушительных процессов на ее фронте появляются узловые точки, маркирующие аномальные геологические события. Согласно эксперименту, спиральные волны возникают в условиях нараста-

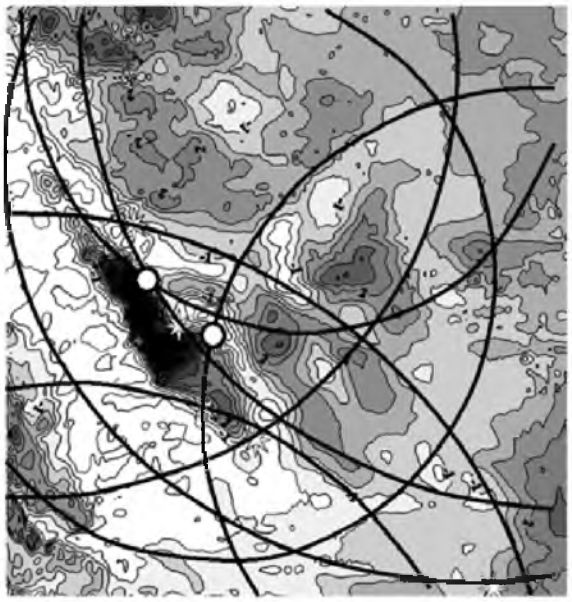


Рис.4. Распознавание образов без обучения по гравитационному полю, измеренному в районе Анабарского щита. Объектом распознавания служат трубки взрыва. Метод распознавания – восстановление участков спиральных структур по разнопорядковым дисперсионным аномалиям гравитационного поля. Фон образован гравитационным полем (в условных единицах) с прогнозными объектами (светлые звездочки). Семейство соосных дисперсионных аномалий объединены в дуговые спиралевидные формы. Максимальные значения дисперсии гравитационного поля, попадающие на дуговые формы, маркируют перспективные объекты (светлые кружки)

ния плотностного неравновесия в лабораторной системе и связанной с этим нарастанием трансформации диссипативного ячеистого структурирования слоя вязкой жидкости. На фронте спиральной волны появляются особые точки, где может изменяться структура течения потока жидкости; они могут рассматриваться как аномальные. При наличии некоторых площадных данных мониторинга (например, космической спектрозональной съемки) аномальные точки на фронте логнормальной спиральной волны выявляются по областям наибольшей изменчивости обрабатываемого скалярного поля. Можно прогнозировать тип аномального геологического объекта, попадающего в область отмеченной выше узловой точки: как показывает эмпирический опыт, эффективным критерием такого прогноза служит величина радиуса ветви логнормальной спирали. Данный критерий справедлив как для непотенциальных полей (например, поля оптической плотности космоснимка), так и для потенциальных полей: гравитационного и магнитного (рис.4).

В итоге была разработана система формальных критериев дешифрирования (структурного анализа) спектрозональных космоснимков. На ее основе создана апробированная технология поиска факторов структурного контроля рудных объектов разного ранга. В отличие от распространенных программных разработок (LESSA в системе ER DAS) наши алгоритмы генерируют карты, каждая из которых отличается своим уровнем генерализации и содержит структуры определенного ранга, образующие неразрывный структурный каркас полигона. Закономерность этого структурного каркаса обусловлена правдоподобными пространственными соотношениями кольцевых и линейных структур: смещением более древних образований относительно более молодых; стяжением линейных структур внутри структуры центрального типа к ее геометрическому центру (области дискордантного соотношения разновозрастных структурных планов); отсутствием пересечения протяженных структур разного простирания без смещения или выклинивания одной из них и т.д. На основе таких карт, называемых здесь структурно-тектоническими, выполняется программными средствами эталонный и безэталонный прогноз, в которых доминируют следующие критерии:

- участки наложения структурных планов разного простирания, маркируемые кольцевой структурой как участки наибольшей проницаемости земной коры;
- пространственная периодичность в семействе таких участков, допускающая при наличии двух и более эталонных объектов прогноз специализированного рудного объекта [4];
- вложенные структуры центрального типа, допускающие аппроксимацию логнормальными спиралями, в пределах которых возможен безэталонный прогноз специализированного рудного объекта по позиции так называемых особых точек.

Работа выполнена в Центре коллективного пользования научным оборудованием Горного университета при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Мовчан И.Б.* Прикладные аспекты теории диссипативного структурирования неравновесной геологической среды // Петров О.В. Диссипативные структуры Земли как проявление волновых свойств материи. СПб, 2007. С.202-268.

2. *Орлов В.К.* 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. // Геофизика и современный мир:Труды Межд.конф. М., 1994. С.154-155.

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

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

REFERENCES

1. *Movchan I.B.* Applied aspects of the theory of dissipative structure of the nonequilibrium geological environment // Petrov O.V. Dissipative structure of the Earth as the manifestion of matter ware properties. Saint Petersburg, 2007. P.202-268.

2. *Orlov V.K.* Interpretation of geophysical data for detecting the underlying discordant structures controlling ore formation and magmatism of mantle origin / V.K.Orlov, T.A.Milay, I.B.Movchan // Geophysics and the modern world: Issues of Intern. conf. M., 1994. P.154-155

3. *Petrov O.V.* Internal gravity-related waves of the Earth and non-linear palaeogeodynamic dissipative structures// Rep. of the Russian Acadamy of Science. 1992. Vol.326. N 2. P.323-326

4. *Serkerov S.A.* Spectrum analysis in gravity and magnetic survey. Moscow, 1991. 279 p.