

6. Трегуб А.И. Элементы первого ранга в неотектонической структуре территории ВКМ // Вестн. Воронеж. ун-та. Сер. геологическая. -1999. -№8. -С. 9-17.
7. Философов В.П. Основы морфометрического метода поисков тектонических структур. -Саратов, 1975. -232с.
8. Флоренсов Н.А. Проблемы теоретической геоморфологии // Рельеф и неотектоника: Избр. тр. -М., 1989. -С. 139-222.
9. Шарапов И.П. Функции распределения высоты рельефа // Рельеф Земли и математика. -М., 1967. -С. 72-79.
10. Экзогенные геодинамические процессы: оценка, прогноз, мониторинг (на примере Воронежской области) / А.И.Трегуб, Б.В.Глушков, Н.А.Корабельников и др. -Воронеж, 1999. -76 с.

УДК 551:550.347.097.23

Четвериков Л.И.

## ОЦЕНКА АНИЗОТРОПИИ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Рассмотрен простой палеточный метод определения природной анизотропии строения геологических тел и полей геологических, минералогических, геохимических и геофизических параметров. В результате оказывается возможным получать дополнительную интересную информацию об изучаемых объектах. Рассмотрены несколько конкретных примеров из разных областей геологии.

В 1966 году было высказано положение об анизотропном строении тел полезных ископаемых [4] и предложены основные характеристики этой анизотропии [7]. В дальнейшем данная идея была распространена на структуру всех геологических объектов, начиная от мегаобъектов (горных сооружений) и кончая микрообъектами (петроструктуры пород) [5]. В настоящее время представление о анизотропном строении геологических объектов не вызывает возражений. Вместе с тем, определение анизотропии изучаемого геологического объекта еще не вошло в широкую практику исследований, несмотря на то, что анализ анизотропии дает дополнительную и интересную информацию как о строении самого объекта, так и о возможном характере его генезиса [7,9,10]. Знание анизотропии тел полезных ископаемых имеет большое значение и для оптимизации геометрии разведочных сетей [8].

В данном случае под *анизотропией структуры строения геологического объекта* понимается различие в скорости смены геологических элементов структуры по разным направлениям внутри геологического объекта.

В свою очередь под *анизотропией поля геологических и геофизических параметров* понимается различия в значении среднего градиента изменчивости параметра, фиксируемые по разным направлениям в пределах поля.

В одном геологическом объекте могут быть выделены разные группы геологических элементов, образующих в объекте свою структуру. В зависимости от специфики генезиса объекта анизотропии структур разных групп элементов могут отличаться друг от друга. То же самое может иметь место и для анизотропии изменчивости полей разных параметров одного и того же геологического объекта. Например, нередко анизотропия изменчивости содержания для разных компонентов руды оказывается в рудном теле неодинаковой, что является следствием особенностей этапов его

формирования. Таким образом, изучение анизотропии может дать важную дополнительную информацию о строении и генезисе геологического объекта.

Полная характеристика анизотропии осуществляется с помощью четырех показателей [7,8]:

1. Показателем изменчивости ( $i$ ) по конкретной линии внутри объекта, представляющим собой: для структуры - отношение количества ( $n$ ) пересекаемых этой линией элементов к ее длине ( $l$ ) в пределах объекта ( $i = n/l$ ); для поля - средний градиент изменчивости параметра наблюдаемым по данной линии. Средняя изменчивость ( $I$ ) по конкретному направлению выражается средним значением из значений изменчивости, фиксируемых по отдельным линиям, ориентированным в данном направлении

$$I = \frac{\sum i}{m},$$

где  $m$  - количество линий.

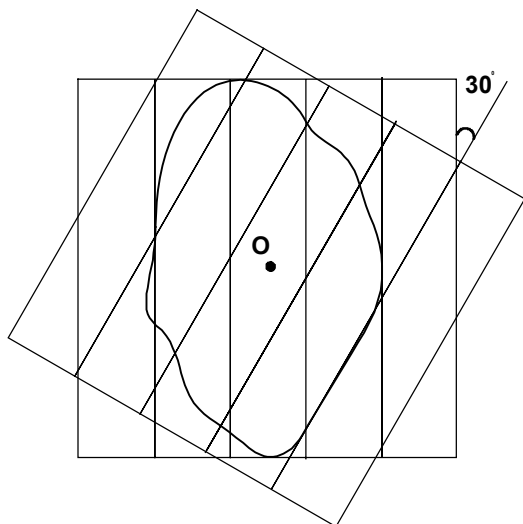
2. Количеством и ориентировкой осей (иначе направлений) анизотропии. Под осями анизотропии понимаются направления внутри изучаемого объекта, по которым наблюдаются наибольшие различия в изменчивости структуры или поведения параметра.

3. Показателем анизотропии ( $A$ ), представляющим собой отношение значения наибольшей изменчивости структуры или параметра к наименьшему их значению.

4. Индикатрисой анизотропии - эллипсоидной поверхности, величина радиуса вектора которой, в том или ином масштабе соответствует значению изменчивости структуры или параметра внутри объекта в направлении данного радиуса вектора.

Как правило геологические объекты изображаются на плоскости в двумерном пространстве (карты, планы, разрезы, сечения и т.д.). В связи с этим оценка анизотропии также имеет двумерное решение.

Для определения анизотропии геологической структуры и строения поля можно воспользоваться одним и тем же палеточным методом [6]. Заключа-



**Рис 1. Палетка и ее наложение при определении анизотропии.**

ется он в следующем. Берется палетка из прозрачного материала, представляющая собой систему параллельных линий, расположенных на одинаковом расстоянии друг от друга. Размер палетки выбирается так, чтобы она полностью покрывала изображение объекта на плане при любой ее ориентировке относительно контура объекта. Палетка накладывается так, чтобы геометрический центр палетки оказался совмещенным с геометрическим центром (о) контура изображения объекта на плане (рис.1). В принципе исходная ориентировка линий палетки не имеет значения. Практика показывает, что форма контура как правило отражает ориентировку осей анизотропии. Большая ось оказывается ориентированной по ширине, а меньшая в направлении вытянутости контура. Если это не наблюдается, то подобный факт говорит о том, что первичная форма объекта подверглась в дальнейшем тектоническим, эрозионным и другим нарушениям [7,8]. Учитывая данное обстоятельство при наличии вытянутой формы целесообразно первоначально ориентировать палетку по ширине или длине объекта (рис.1).

В случае определения анизотропии геологической структуры для вычисления средней изменчивости ( $I$ ) при конкретной ориентировке палетки вначале подсчитывается суммарное количество геологических элементов структуры, пересекаемое всеми линиями палетки. Затем это суммарное количество элементов делится на суммарную длину всех линий палетки в пределах контура объекта

$$I = \frac{\sum n}{\sum l},$$

где  $n$  - количество элементов структуры, пересекаемое одной линией;  $l$  - длина этой линии палетки в пределах контура объекта.

Когда интересует анизотропия поля параметра, то это можно сделать только после его геометризации методом изолиний. После этого определенное подобным образом суммарное значение заложений

при конкретной ориентировке палетки делится на сумму длин линий палетки в пределах контура поля

$$I = \frac{\sum x}{\sum l},$$

где  $x$  - значение отдельного заложения между двумя соседними изолиниями;  $l$  - длины одной линии палетки. Если величина заложения изолиний постоянна и равна  $K$ , то

$$I = K \frac{n}{\sum l},$$

где  $n$  - количество интервалов между изолиниями, пересекаемых всеми линиями палетки при данной ее ориентировке;  $l$  - длина отдельной линии палетки в пределах контура, изучаемого объекта.

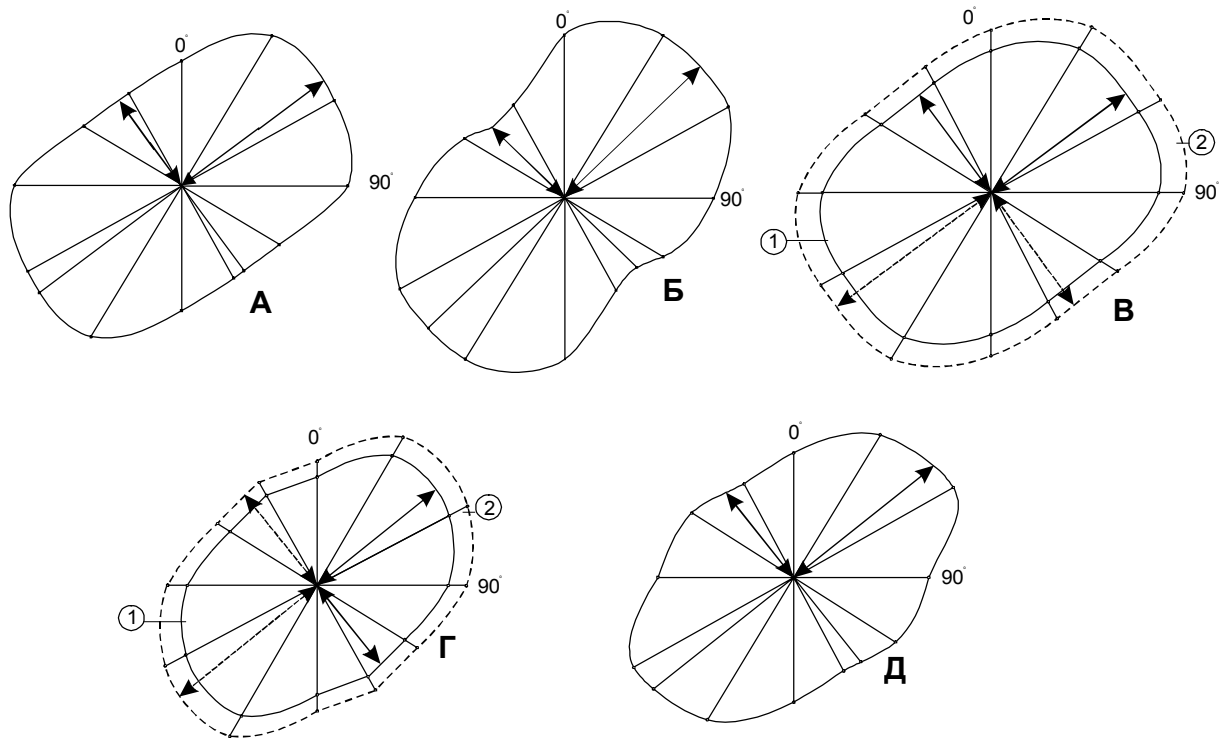
Немаловажное значение имеет расстояние между линиями в палетке. Чем оно меньше, тем точнее результат, но тем больше трудоемкость по определению анизотропии. Оптимальным является: а) для геологических структур расстояние между линиями палетки примерно равно среднему поперечному размеру геологических элементов; б) для полей параметров оно отвечает среднему расстоянию между изолиниями на плане.

После определения значения  $I$  для конкретной ориентировки палетки, иначе в конкретном направлении внутри объекта, палетка поворачивается вокруг точки  $O$  на  $30^\circ$  (рис.1) и все повторяется при новой ориентировке палетки. И так до поворота палетки на  $150^\circ$ . В том случае, когда возникают какие либо неясности при построении индикатрисы анизотропии можно получить дополнительные значения  $I$  для интересующих промежуточных положений палетки.

После этого по значениям  $I$  при разной ориентировке палетки строится индикатриса анизотропии. Для этого из одного центра проводится пучок прямых линий, ориентировка которых соответствует ориентировкам палетки. На этих линиях в обе стороны от центра в выбранном масштабе откладываются значения  $I$ , полученные при соответствующей ориентировке палетки. Концы отрезков соединяются плавной замкнутой кривой линией, которая выражает искомую двумерную индикатрису анизотропии (рис.2,3,4). Отношение наибольшей оси индикатрисы к меньшей, иначе отношение наибольшего расстояния по прямой от центра до кривой к наименьшему является показателем анизотропии ( $A$ ) (табл.).

При наличии хорошей компьютерной базы с малоформатной телекамерой процесс определения анизотропии любого вида геологических объектов может быть автоматизирован на основе методики, разработанной Д.Л.Четвериковым для анализа текстур [11].

Как уже ранее отмечалось, оценка анизотропии геологического объекта позволяет получать о нем новую дополнительную информацию. Рассмотрим в этом плане четыре примера из разных областей геологии.



**Рис.2** Индикатрисы анизотропии показателей строения Главной залежи Гусевогорского месторождения: А - для геологической карты; Б - для карты размещения типов руды; В - для ферромагнитных планов (1 - на горизонте 235м, 2 - на поверхности); Г - для планов содержания  $TiO_3$ : (1 - на горизонте 235м; 2 - на поверхности); Д - план содержания  $V_2O_5$  на поверхности.

Первый пример. В рамках изучения пироксенитов Качканара В.Г.Фоминим, П.И.Самойловым, В.А.Макаровым и Г.С.Максимовым была проделана большая работа по всесторонней геометризации строения Главной залежи Гусевогорского железорудного месторождения. В монографии “Пироксениты Качканара” [3] приводятся следующие графические материалы:

Геологическая карта Главной залежи, на которой в качестве структурных элементов строения залежи выделены оливиниты, верлиты, пироксениты, горнблендиты и другие слагающие ее породы.

Схематическая карта размещения трех технологических типов руд на поверхности Главной залежи: тонкозернистая труднообогатимая, мелкозернистая среднеобогатимая и средне и крупнозернистая легкообогатимая руда.

Два феррометрических плана Главной залежи для поверхности и горизонта 235 м в изолиниях с постоянным заложением в 2%, т.е. изолинии проведены через 2% изменения содержания железа.

Два подобных плана (для поверхности горизонта 235 м) в изолиниях содержания  $TiO_3$ , с заложением в 0,3%.

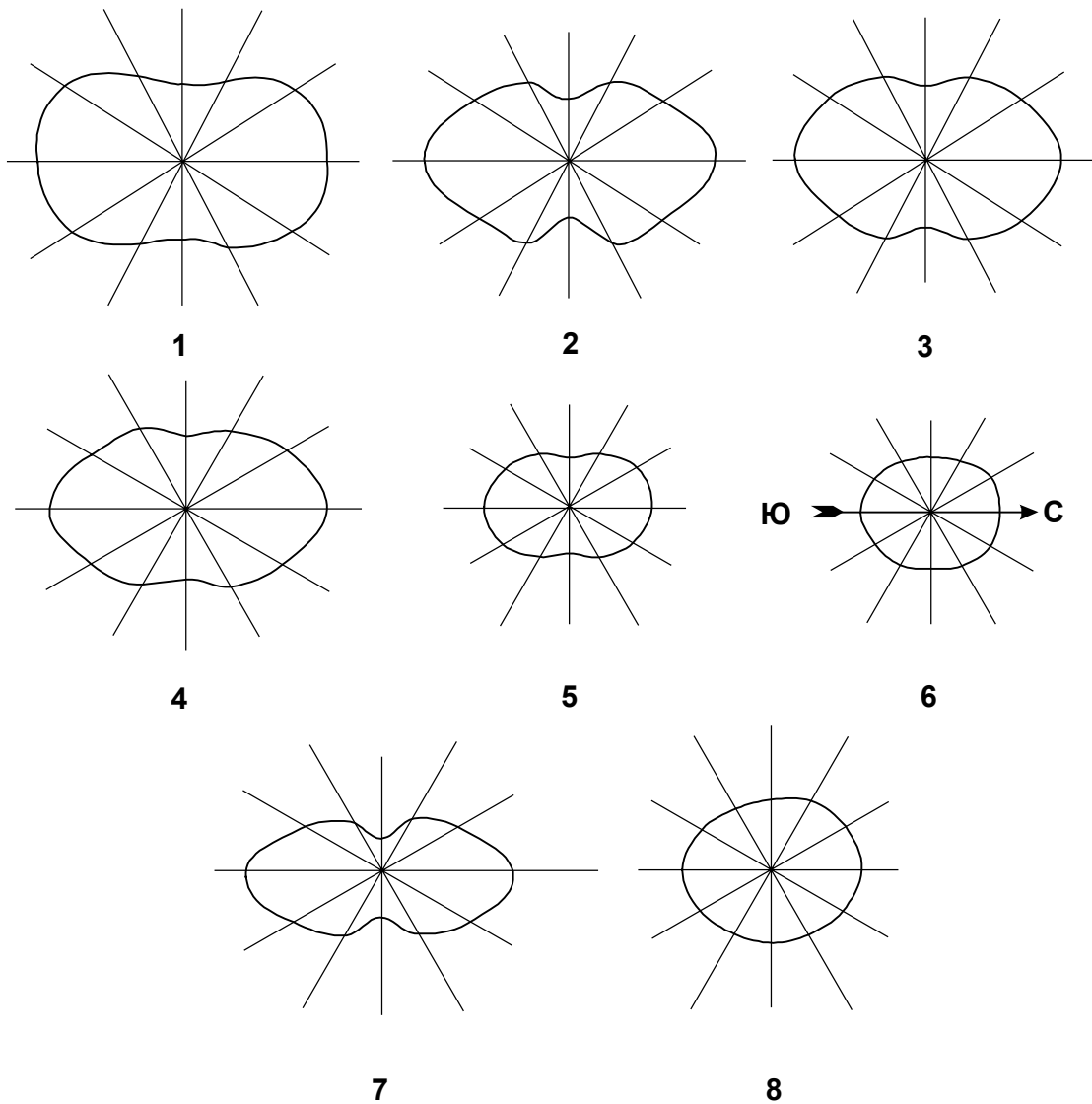
Поверхностный план изолиний содержания  $V_2O_5$  Главной залежи (заложение изолиний в 0,04%).

Для всех этих карт и планов построены индикатрисы анизотропии, показанные на рис.2, которые для удобства изображения построены в разном масштабе. Анализ полученных данных позволяет сделать следующие заключения. Во всех случаях имеет

место практически одинаковые (с учетом погрешностей определения) анизотропии для которых характерна одинаковая ориентировка осей анизотропии, близкие по форме индикатрисы и значения показателей анизотропий. Обращает на себя внимание уменьшение размера индикатрисы на горизонте 235 (рис.2), что говорит о менее сложном характере размещения оруденения на глубине и, видимо, также более простом геологическом строении главной залежи. В целом все указывает на наличие тесной связи между формированием пироксенитового массива и образованием в нем оруденения.

Второй пример. Даже при беглом взгляде на геологические карты СССР хорошо видно, что все горные сооружения вытянутой формы имеют в плане анизотропное строение. Вдоль своей вытянутости они более выдержаны в своем строении, чем в поперечном направлении. Для оценки подобной анизотропии были выбраны три вытянутых горных сооружения: Кавказ, Урал и Сихоте-Алинь и для сравнения Балтийский щит в границах СССР. Урал оценивался раздельно тремя частями: Полярный (до г.Народная), Средний, включая и Северный (до г.Кыштым) и Южный Урал. Кавказ оценивался раздельно. Большой Кавказский хребет и Малый Кавказский хребет.

Для проведения эксперимента были взяты соответствующие листы геологической карты СССР, М 1:5 000 000, 1955г. Карта данного масштаба была выбрана исключительно, исходя из удобства работы с палеткой. Дело в том, что на характер анизотропии не оказывает влияние ни масштаб карты, ни количе-



**Рис 3. Индикатрисы анизотропии строения горных сооружений:** 1 - Полярного Урала; 2 - Среднего Урала; 3 - Южного Урала; 4 - Урала в целом; 5 - Сихотэ Алия; 6 - Балтийского щита; 7 - Большого Кавказа; 8 - Малого Кавказа.

**Таблица**  
**Значения показателя анизотропии**

№ пп	Горное сооружение	Показатель анизотропии <i>A</i>	<i>K</i>
1	Урал (в целом)	2	0,14
2	Полярный Урал	2	0,4
3	Средний Урал	2,5	0,35
4	Южный Урал	1,85	0,5
5	Сихотэ Алия	1,8	0,3
6	Большой Кавказ	3,1	0,32
7	Малый Кавказ	1,25	0,3
8	Балтийский щит	1,17	-

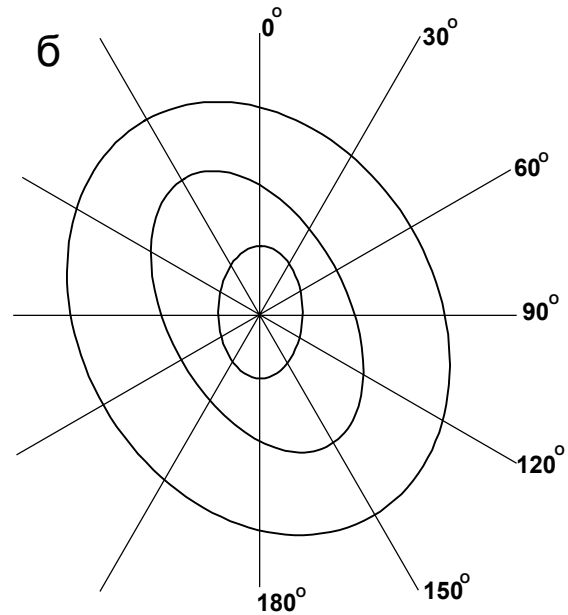
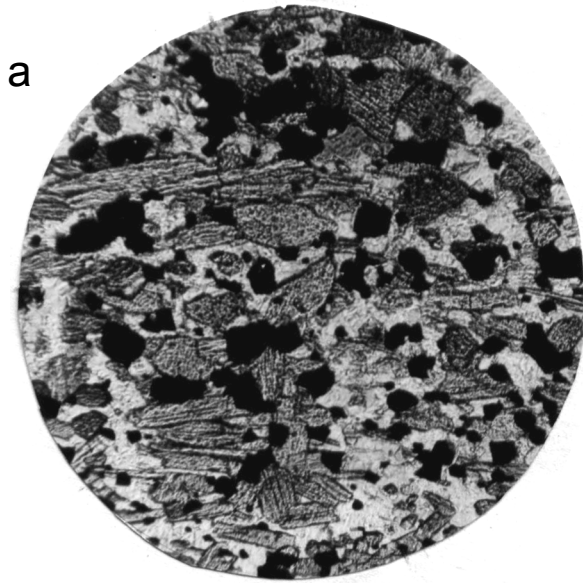
ство выделяемых геологических элементов, ни их генетическая интерпретация. Количество выделяемых элементов отражается только на размере индикатрисы анизотропии. В этом можно легко убедиться, проведя соответствующие эксперименты на геологической карте СССР, М 1:2 500 000, 1983г. и даже такой же тектонической карте.

Результаты определения анизотропии показаны на рис.3 и в таблице. Их кратко можно свести к следующему.

Как и предполагалось, все горные сооружения, кроме Балтийского щита отчетливо выраженную анизотропию с одинаковой ориентировкой осей относительно общей формы горного сооружения на карте. Значения показателя анизотропии *A* существенно разнятся, но при этом величина показателя пропорциональности *K* меняется мало (табл.).

На последней особенности следует остановиться особо. При анализе самых разных геологических объектов обращает на себя внимание следующее: наличие тесной связи между анизотропией внутреннего строения и общей внешней формой геологического объекта. Если внешняя форма не нарушена последующими геологическими процессами (эрозией, тектоникой и т.д.), то чем более анизотропным по своему строению оказывается объект, тем более вытянутую форму он имеет. Подобную зависимость можно выразить в виде простой формулы

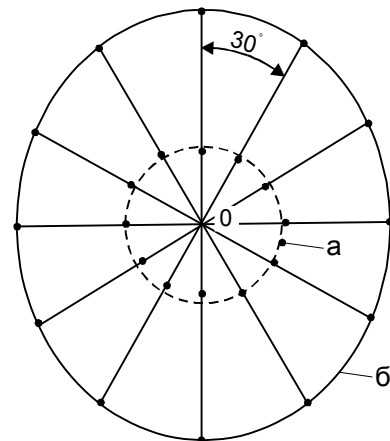
$$A=KB, \text{ при } B = \frac{l^2}{S},$$



**Рис. 4. Шлиф кумингтонито-магнетитового железистого кварцита и индикатрисы анизотропии его структуры:** 1 - индикатрисы анизотропии шлифа в целом; 2 - индикатриса анизотропии размещения нерудных минералов; 3 - индикатриса размещения зерен магнетита.

где  $A$  - показатель анизотропии,  $K$  - коэффициент пропорциональности,  $B$  - показатель вытянутости формы объекта,  $l$  - длина объекта в направлении вытянутости его формы,  $S$  - площадь контура объекта на плане. Наличие подобной зависимости объясняется тем, что анизотропия строения и вытянутость объекта являются следствием общей причины - геометрии его генезиса [7,9,10]. Имеющиеся данные показывают, что в случае однотипных геологических объектов одинакового генезиса значения коэффициента пропорциональности практически одинаковы. Данный факт имеет большое практическое значение для оптимизации геометрии разведочной сети, прогнозирования поведения тел полезных ископаемых на глубину [8] и интерпретации генезиса геологических объектов.

Третий пример. На рис.4 приведена фотография шлифа кумингтонито-магнетитового железистого кварцита, на которой зернисто-вкрапленная агрегация магнетита отчетливо выделяется своим черным цветом. На первый взгляд порода и оруденение в ней имеют изотропное строение. Возникает вопрос - какую дополнительную информацию можно получить путем анализа анизотропии рассмотренным методом. Для этого вначале была установлена анизотропия структуры породы в целом. Затем анизотропия без учета оруденения и, наконец, анизотропия размещения агрегаций магнетита. Полученные данные достаточно интересны (рис.4). Анизотропии отличаются друг от друга по величине показателя, размеру и ориентировке индикатрис. Если различия в размере можно объяснить различием количества участвовавших минеральных элементов, различия в показателе анизотропии разной формой минералов породы и рудных агрегаций, первые имеют более вытянутую форму, чем вторые, то несовпадение ориентировок на  $30^\circ$  осей ани-



**Рис. 5. Анизотропия изменчивости параметров угольного пласта Подмосковского бассейна:** а - индикатриса анизотропии зольности; б - мощности угольного пласта.

тропии породы и оруденения заслуживает особого генетического осмысления.

Четвертый пример. Г.И.Вилесовым была проведена геометризация изолиниями зольности и мощности угольного пласта Подмосковского бассейна. Для этого пласта были построены индикатрисы анизотропии зольности и мощности (рис.5). Оказалось, что для зольности характерна одинаковая изменчивость в плоскости пласта ( $A \approx 1$ ; рис.5,а), а для мощности небольшая, но отчетливо выраженная анизотропия ( $A=1,2$ ; рис.5,б). Данный факт позволяет сделать заключение о том, что на формирование морфологии и внутреннего строения угольного пласта оказывали влияние разные факторы. При этом наличие анизотропии указывает на то, что действие морфологических факторов было ориентированным по латерали в отличие от изотропного действия

формировавших строение в плане угольного пласта [7,9].

Рассмотренными четырьмя примерами далеко не исчерпываются возможности палеточного метода оценки анизотропии как в геологии, так и геофизике и инженерной геологии. Представляется, например, что интересную дополнительную информацию можно получить из сравнения анизотропий, приводимых в работе И.П.Лебедева, С.П.Молоткова, И.И.Кривцова и В.И.Лосицкого "Структурно-геологические особенности Воронцовской серии Воронежского кристаллического массива (ВКМ)" [2], геологической карты, карты метаморфической зональности и трех геофизических схем юго-восточной части ВКМ.

Подобным методом можно определять анизотропии: текстур пород и руд, строения тел полезных ископаемых, что очень важно для оптимизации геометрии разведочной сети, а так же трещиноватости пород и так далее.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Геологические тела. -М, 1986. -333с.
2. Лебедев И.П., Молотков С.П., Кривцов И.И., Лосицкий В.И. Структурно-геологические особенности Во-

- ронцовской серии Воронежского кристаллического массива // Вестн. Воронеж. ун-та. Сер. геол. -1999. -№7. -С.25-30.
3. Фоминых В.Г., Самойлов П.И., Максимов Г.С., Макаров В.А. Пироксениты Качканара. -Свердловск, 1967. -84с.
4. Четвериков Л.И. Анизотропия строения тел полезных ископаемых // Научн. конференция ВГУ. Секция геол. Доклады. -Воронеж, 1966. -С.4-6.
5. Четвериков Л.И. Симметрия анизотропии структуры геологических тел // Симметрия в природе. -Л, 1971. -С.207-210.
6. Четвериков Л.И. Оценка анизотропии наблюдаемой изменчивости параметров тел полезных ископаемых // Изв. вузов. Горный журнал. -1972. -№4. -С.36-40.
7. Четвериков Л.И. Теоретические основы моделирования тел твердых полезных ископаемых. -Воронеж, 1968. -150с.
8. Четвериков Л.И. Теоретические основы разведки недр. -М., 1984. -164с.
9. Четвериков Л.И. Геокинематика // Отечественная геол. -1993. -№7. -с.86-89.
10. Четвериков Л.И. Геокинематика тектонических зон // Вестн. Воронеж. ун-та. Сер. 2.- 1996.- №2. -С. 63-78.
11. Chetverikov D. Texture analysis using feature-based pairwise interaction maps // Pattern Recognition. -1999. -№32. -С.482-502.

УДК 550.8 (470.32)

Лукьянов В.Ф.

## РАДИАЛЬНО-КОНЦЕНТРИЧЕСКИЕ СТРУКТУРЫ В ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ВОРОНЕЖСКОГО КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО МАССИВА (ВКМ)

В статье на основе обзора существующих представлений о структурах центрального типа дается характеристика аналогичных структур ВКМ, отмечаются особенности их строения и проявления в докембрийском фундаменте, указывается вероятная глубина генерирующих очагов.

Одним из перспективных направлений в области совершенствования поисково-разведочных работ является изучение процессов очаговой геодинамики. В этой связи особый интерес вызывают системы радиально-концентрических структур (РКС), очаговая природа и мантийное заложение которых обосновывается в ряде работ [9,10,13,16,17 и др.]. Процессы очаговой геодинамики весьма разнообразны и включают мантийный и астеносферный диапиризм, магматогенный и газотермальный метаморфизм, адвекцию, фазовые превращения, вулканизм и др.

Структуры центрального типа (СЦТ) известны с 30-х годов нашего столетия, но представления об этих структурах длительное время практически не развивались. Лишь в 70-80-ые годы в связи с дешифрированием высотных и космических снимков СЦТ вновь обратили на себя внимание [1,2,7]. Однако в силу традиционно сложившихся представлений они, как правило, сопоставлялись с конкретны-

ми геологическими телами (интрузиями, гранитно-гнейсовыми куполами, вулканами, кальдерами).

Последующие исследования позволили установить важную роль в формировании структур центрального типа радиально-концентрических элементов [15,16]. В настоящее время рядом исследователей доказывается строгая организованность дислокаций центрального типа, выраженных системами дуговых морфоструктурных и тектонических элементов с концентрическим планом заложения [9,10,12].

Многие из известных кольцевых структур обладают центрально-симметричным расположением составляющих их элементов и относятся (независимо от происхождения и возраста) к одному классу структур центрального типа [8]. Радиально-концентрические элементы каркаса кольцевых структур (КС) выявляются по геолого-геофизическим материалам в виде тектонических линий или зон, гравимагнитных аномалий или их градиентов.