

УДК 550.83:519.241

## К МЕТОДИКЕ ОЦЕНКИ И ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИИ АНИЗОТРОПИИ ФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

Г.В. Ерофеева, Л.Я. Ерофеев

Томский политехнический университет

E-mail: geof@tpu.ru

*Анализируются возможности процедур оценки анизотропии физических полей, изучаемых в разведочной геофизике. Предлагается новая методика определения анизотропии поля для аномалий второго и более мелкого порядков, на конкретном примере магнитного поля показывается ее эффективность.*

### **Ключевые слова:**

*Магнитное поле, анизотропия, методика оценки анизотропии поля, природа анизотропии магнитного поля.*

### **Key words:**

*Magnetic field, anisotropy, method of estimating the anisotropy of the field, nature of the anisotropy of the magnetic field.*

При интерпретации материалов геофизических съёмок иногда используется как самостоятельный признак анизотропия поля, который позволяет судить о ряде особенностей геологического строения обследуемых площадей [1–7].

Количественная оценка анизотропии поля в разведочной геофизике проводится двумя способами. В одном случае по массиву цифр наблюдаемого параметра поля вычисляется двойная автокорреляционная функция (ДАКФ), в другом – определяются углы направления линий равных значений поля заданных уровней (определяется полярная диаграмма – ПД).

Полученные ПД или ДАКФ дают оценку анизотропии в интегральной форме. В них отражается характер изменений параметра поля по разным направлениям различных порядков. Вклад возмущений поля каждого порядка в общую совокупность (ПД, ДАКФ) является неаддитивным, поскольку процедуры определения ПД и ДАКФ являются селектирующими преобразованиями.

Фильтрующие свойства этих преобразований различны и сводятся к следующему. ДАКФ представляет собой трансформацию поля, состоящую из суммы изменений с теми же частотами, что и исходное, но с измененными амплитудами колебаний – амплитуда каждой последующей гармоники, в сторону роста частоты, резко уменьшается.

Действительно, допуская, что функция некоторого параметра поля является чёткой функцией, её можно представить рядом:

$$F(x) = \sum_{k=1}^{\infty} A_k \cos \omega_k x$$

или

$$F(x) = A_1 \left( \cos \omega_1 x + \sum_{k=2}^{\infty} A_k \cos \omega_k x \right),$$

где  $A_k$  – отношение всех амплитуд к наибольшей.

Корреляционная функция  $F(x)$  этого поля представляется таким выражением:

$$F^1(x) = \frac{A_1^2}{2} A_1 \left( \cos \omega_1 + \sum_{k=2}^{\infty} A_k^2 \cos \omega_k x \right),$$

из которого видно, что вклад всех гармоник с амплитудами, меньшими  $A_1$ , в преобразованном поле с ростом частоты падает.

Получение ПД предусматривает выполнение двух основных операций: вычисление координат точек изолиний и взятие отчёта азимута изолиний. Эти операции по своему селектирующему воздействию не одинаковы. При проведении (вычислении координаты по заданным сечениям) изолиний в качестве независимой переменной выступает функция, а при определении азимута – аргумент.

В первой операции происходит амплитудная селекция, во второй – частотная.

В процедуре проведения изолиний вклад различных возмущений в ПД составляет величину, в первом приближении прямо пропорциональную амплитуде аномалии. Другими словами, разноамплитудные возмущения в ПД представляются различным числом  $n_a$  изолиний (сечений), которое, в случае нормального распределения амплитуды параметра поля, определится следующей зависимостью [8]:

$$n_a = \frac{\delta_v}{2\pi\delta_x} \exp\left[-\frac{(a-\bar{x})^2}{2\delta_x^2}\right], \quad (*)$$

где  $a$  – уровень изолинии (сечения),  $\delta_x$  – среднее квадратическое отклонение  $F(x)$ ,  $\bar{x}$  – математическое ожидание,  $\delta_v$  – среднее квадратическое отклонение первой производной.

Отсчёты азимута направления линий равных значений поля берутся в равноотстоящих (по изолинии) друг от друга точках, т. е. непрерывная функция заменяется рядом значений. При этом колебания направления изолиний с периодом, близким или меньшим интервала дискретизации, понятно, не фиксируются в ПД, вклад других, более крупных по площади аномалий, с ростом площади возмущений возрастает.

Символами эту процедуру можно записать так:

$$F(x) = \Delta x \sum_{k=-\infty}^{\infty} F(k\Delta x)\delta(x-k\Delta x) = \Delta x F(x)U_{\Delta x}(x),$$

где  $\Delta x$  – интервал дискретизации функции  $F(x)$ ,  $\delta(x-k\Delta x)$  – дельта-функция Дирака, а

$$U_{\Delta x}(x) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta(x-k\Delta x).$$

Эта функция является периодической с периодом  $\Delta x$ . Её можно разложить в ряд:

$$U_{\Delta x}(x) = \frac{1}{\Delta x} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \exp \cdot in \cdot \frac{2\pi}{\Delta x} x,$$

в силу этого

$$F_{\Delta x}(x) = F(x) \sum_{k=-\infty}^{\infty} \exp \cdot in \cdot \frac{2\pi}{\Delta x} x.$$

Взяв преобразование Фурье от обеих частей этого равенства и используя теорему смещения в области комплексного переменного, получим следующее выражение для спектра дискретной функции [9]:

$$D_{\Delta x}(i\omega) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} D(i\omega - i \frac{2\pi}{\Delta x} n),$$

т. е. спектр функции  $F_{\Delta x}(x)$  получается суммированием смещенных спектров непрерывной функции  $F(x)$ . Смещение определяется величиной  $\Delta x$ . Чем меньше эта величина, тем дальше отстоят смещенные спектры и, стало быть, меньший диапазон их перекрывается.

Итак, применяемые в настоящее время оценки анизотропии физических полей, произведенные непосредственно по результатам наблюдаемых значений поля, позволяют определять «неизомерность» значительных по площади аномалий, которые, как правило, являются и доминирующими по амплитуде. Такие возмущения несут информацию о наиболее крупных геологических неоднородностях, изучение которых с помощью геофизических методов обычно не требует особых способов анализа, основные черты доминирующих возмущений, в том числе и их неизомерность, легко выявляются при визуальном изучении планов изолиний наблюдаемых полей.

На практике чаще всего необходимо уделять больше внимания аномалиям второго и более мелкого порядка. Их анизотропия по-разному проявляется в ДАКФ и ПД.

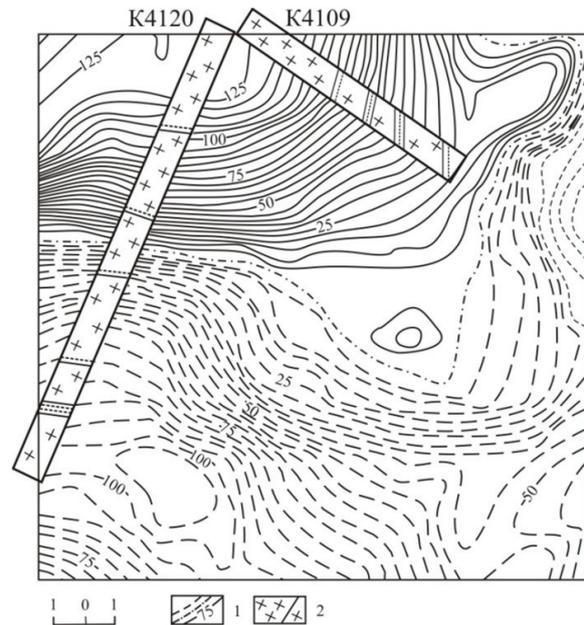


Рис. 1. Магнитное поле и развитие трещиноватости в гранодиоритах на пл. № 25 Центрального массива: 1) изолинии индукции в нТл; 2) гранодиориты с трещинами по полотну канав

Для определения возможностей оценки средне – высокочастотного диапазона анизотропии способом построения ПД и ДАКФ были использованы материалы магнитной съемки на 117 площадках, расположенных в пределах Центрального золоторудного месторождения Кузнецкого Алатау (размер 20×20 м, сеть наблюдения 2×2 м, точность измерений 1 нТл).

Для примера поле одной из площадок в виде изолиний показано на рис. 1. Вычисление ДАКФ производилось по методике [10], с предварительным направленным суммированием значений приращений индукции по трем и пяти соседним профилям и вычитания суммарного среднего графика из исходных рядовых. Направление суммирования второго порядка было принято 30° (СВ направление, отчетливо

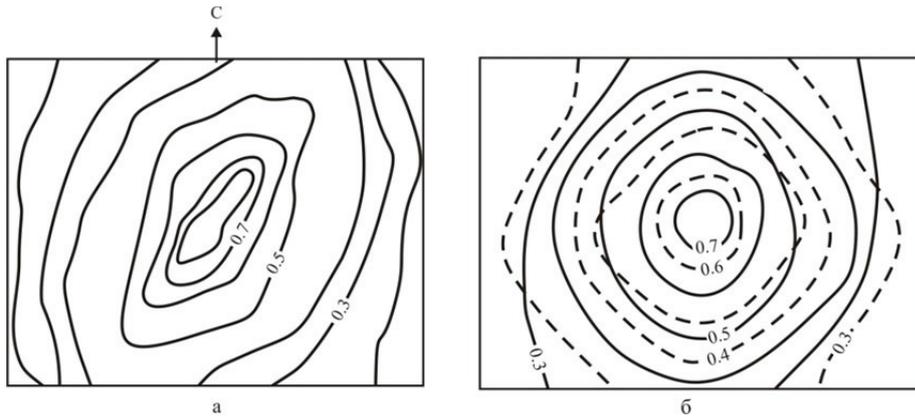


Рис. 2. Двухмерные автокорреляционные функции магнитного поля первого (а), второго и третьего (пунктир) (б) порядков

проявляющееся на ДАКФ первого порядка, рис. 2, а). Все ДАКФ высоких порядков (2, 3 и 4-го) оказались изомерными. ДАКФ второго и третьего порядков, для примера, изображена на рис. 2, б).

Анализ анизотропии поля путём построения ПД произведён по схеме, при которой осуществлялась амплитудная фильтрация. Сущность используемого преобразования заключается в следующем.

По результатам определения азимута простирания равных значений приращений индукции (изолиний) строятся частные диаграммы для групп соседних изолиний, включающих каждая по несколько изолиний. Число их в группе, также как и число групп, определяется степенью «сложности» поля и, как показывает практика применения предлагаемого способа, составляет 3–6. Построение ПД целесообразно осуществлять в такой последовательности. В начале строится общая диаграмма для 3 или 5 изолиний, среди которых средней изолинией является нулевая изолиния, которая должна соответствовать значению параметра поля, близкому к значению его математического ожидания. Диаграммы третьего и последующих уровней строятся по 4 или 6 (четному числу) изолиниям, одна половина которых берется из отрицательной, другая – из положительной областей изменения параметра.

Нетрудно видеть, что эти диаграммы отражают простирание различных совокупностей аномалий. Диаграмма первого уровня, согласно зависимости (\*), характеризует простирание наибольшей части возмущений поля, второго уровня – главным образом тех аномалий, амплитуды которых больше этого уровня, третьего уровня и т. д.

Такая приближенная оценка анизотропии даёт возможность определить наличие и выявить преимущественные направления в простирании линейно-вытянутых элементов геологического строения обследуемых площадей, создающих аномалии высоких порядков.

На рис. 3 приведены полярные диаграммы направленности изолиний приращений вертикальной составляющей амплитуды индукции магнитного поля выше упомянутых 117 площадок съёмки. ПД (рис. 3, а) построена по всем изолиниям (сечение 5 нТл), т. е. она общая, отражает направленность всех изодинам, но в разной степени, диаграмма рис. 3, б – пяти изолиний: +10; +5; 0; –5; –10, следующие – шести: +15; +20; +25; –15; –20; –25 и т. д.

По диаграммам рис. 3, б, в, можно видеть, во-первых, что в магнитном поле присутствует две малоамплитудных, но многочисленных группы соиз-

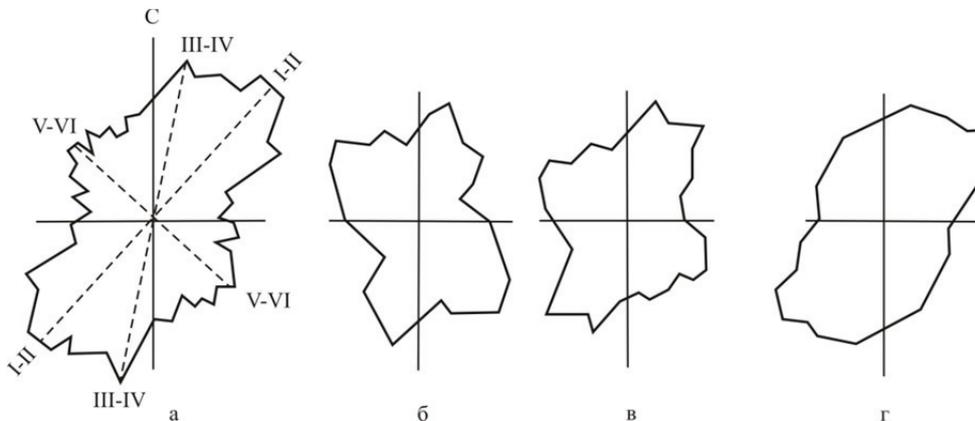


Рис. 3. Общая (а) и частичные (б–г) полярные диаграммы направленности изолиний магнитного поля I–II и далее (пунктир) – направления систем трещиноватости и их номера Центрального диоритового массива

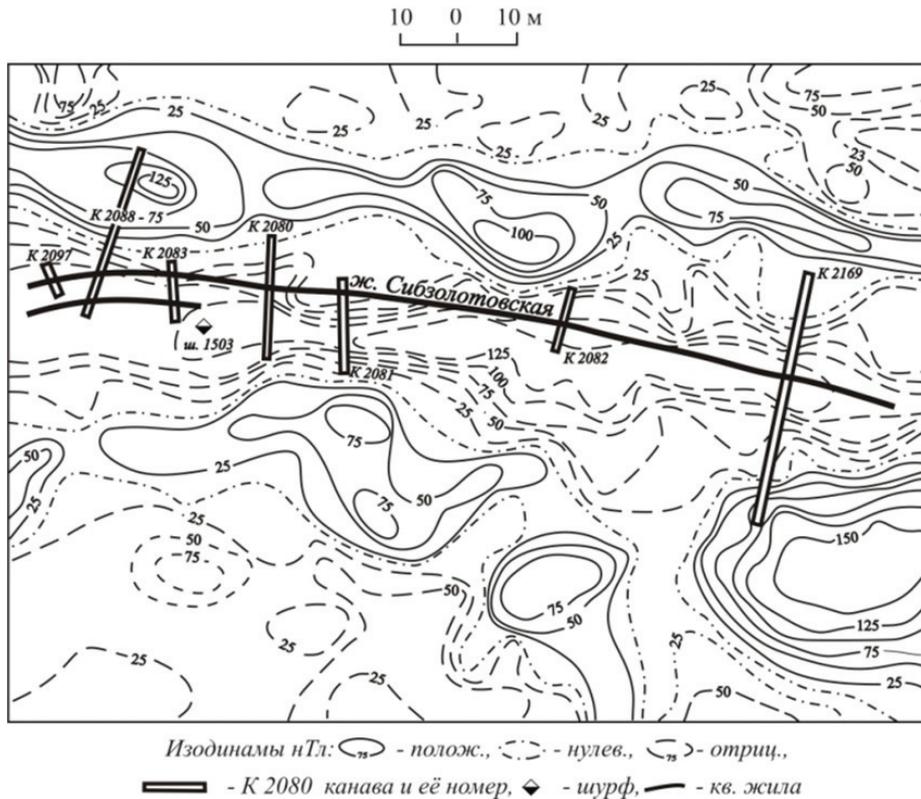


Рис. 4. Магнитное поле над золоторудной жилой Центрального месторождения

меримых и существенно неизомерных аномалий, оси которых в большинстве своём простираются в северо-западном и северо-восточном направлениях и, во-вторых, что возмущения северо-западного направления имеют в среднем меньшую амплитуду по сравнению с северо-восточным, которое отражает простираение наиболее интенсивных по амплитуде аномалий рудных жил.

Из диаграммы рис. 3, г, следует, что изолинии, значения которых превышают  $\pm(25...30)$  нТл, принадлежат главным образом к наиболее крупным по амплитуде и площади неизомерным аномалиям северо-восточного направления. Именно эти возмущения определяют в целом общую форму ПД и ДАКФ. Доминирующие аномалии обусловлены, главным образом, чередованием участков слабомагнитных (лейкокатовые разности) пород с повышенно магнитными (меланократовые разности) участками пород эллипсоидной формы, ориентированных большей осью параллельно контактовой зоне массива с вулканическими образованиями основного и среднего составов.

Центральное месторождение золота Кузнецкого Алатау эксплуатировалось более 100 лет. Значительная часть его рудного поля детально изучена: составлена подробная геологическая карта масштаба 1:5000, определено его тектоническое строение, вплоть до закономерностей развития элементов протектоники в гранитоидном массиве, вмещающим рудные тела кварцево-жильного типа [11, 12].

На общей диаграмме направленности изодинами (рис. 3, а) показаны доминирующие направле-

ния линейно вытянутых неоднородностей: рудных жил, даек, «незалеченных» разрывных нарушений различного порядка. Все эти элементы в магнитном поле сопровождаются весьма неизомерными в плане аномальными зонами, обуславливающими анизотропность поля. Наиболее интенсивные аномалии создают рудные тела СВ простираения, совпадающие с простираением наиболее развитых I–II систем трещиноватости, рис. 3, а. Для примера на рис. 4 показано магнитное поле над одной из таких жил – «Сибзолотовской».

Сопоставляя геологические данные с анизотропией магнитного поля массива, можно видеть, что этот признак поля, определяемый по диаграммам ПД, весьма информативен.

#### Выводы

Процедуры оценки анизотропии физических полей с использованием двойной автокорреляционной функции и полярных диаграмм существенно различаются: в первом случае проявляется неизомерность наиболее крупных по площади и интенсивности аномалий, анизотропия возмущений второго и более мелкого порядка практически не фиксируется, во втором случае направленности изодинам находят заметное отображение, их анизотропию можно оценивать и представлять в «чистом» виде, что позволяет судить о геологическом строении обследуемых площадей, их тектонических структурах и связанных с ними геологических образованиях.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Никитин А.А., Петров А.В. Основные процедуры обработки и интерпретации нестационарных геофизических полей // Геофизика. – 2007. – № 3. – С. 63–70.
2. Барышев А.С. Статистический анализ направлений изолиний гравитационного и магнитного полей // Сб. науч. тр.: Состояние и перспективы развития геофизических работ в Восточной Сибири / под ред. Г.С. Вахромеева. – Иркутск: Иркутский политехнический университет, 1993. – С. 11–14.
3. Дашевская Е.А., Стевас Г.М. Статистический анализ и взаимосвязь магнитного поля и простираения пород на Украинском щите // Геология и разведка. – 1974. – № 3. – С. 135–138.
4. Horton C.W., Hemphkins W.B., Hoffman A.A. A statistical analysis of some aeromagnetic maps from the northwestern Canadian Shield // Geophysical. – 1964. – V. 29. – P. 4–8.
5. Брусиловский Н.В. и др. Магнитное поле и генезис хребта Сакура, Курильская котловина // Геофизика. – 2008. – № 6. – С. 60–70.
6. Елисеев И.С. Интерпретация гравиметрических материалов с использованием угла вектора полного нормированного градиента при изучении верхней мантии // Геофизика. – 2008. – № 5. – С. 3–7.
7. Федюк В.И. Микромагнитная съемка и ее геологические возможности. – М.: Гостоптехиздат, 1968. – 64 с.
8. Свешников А.А. Прикладные методы теории случайных функций. – М.: Наука, 1968. – 463 с.
9. Солодовников В.В. Статистическая динамика линейных систем автоматического управления. – М.: Физматгиз, 1960. – 652 с.
10. Никитин А.А. Теоретические основы обработки геофизической информации. – М.: Недра, 1986. – 342 с.
11. Алабин Л.В. Центральный массив Мартайгинского гранитоидного комплекса (Кузнецкий Алатау) // В кн.: Магматические формации Сибири и Дальнего Востока / под ред. Ю.А. Кузнецова. – М.: Наука, 1971. – С. 169–213.
12. Баженов В.И., Митюшин А.М. Основные черты структуры Центрального золоторудного месторождения (Маринская тайга) // В кн.: Геология золоторудных месторождений Сибири / под ред. Ф.Н. Шахова. – Новосибирск: Наука, 1970. – С. 79–87.

Поступила 24.05.2011 г.

УДК 550.83:551.3

## ДИСКРЕТНЫЕ ИЕРАРХИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ В ГЕОФИЗИКЕ

В.Н. Устинова, И.Г. Устинова

Томский политехнический университет

E-mail: ustinovavn@tpu.ru

*Дискретизация, иерархическая вложенность и наличие типовых форм геологических объектов и геофизических полей позволили выполнить их ранжирование, разработать вероятностно-статистические методы анализа подобных систем и разделения полей. Установлено наличие типовых форм для сейсмических структур; отражённых сейсмических сигналов; в морфологическом проявлении сейсмофаций, вмещающих залежи углеводородов; в пространственном сочетании структурообразующих трещин. Типизация форм структур, морфологических форм геофизических аномалий, сейсмического сигнала с привлечением автокорреляционного анализа нашла применение в процедурах восстановления сейсмического сигнала и структурных построениях, при формировании эффективных графов обработки и интерпретации данных сейсморазведки.*

**Ключевые слова:**

*Сейсмоморфоструктурные карты; типы морфоформ структур, модели сейсмических сигналов; регулярная сеть тектонических трещин; вероятностно-статистическая типизация.*

**Key words:**

*Seismic morphological maps, types of morphological forms for structures, model forms of seismic signals, regular network of tectonic fractures, probabilistic statistical typing.*

Упорядоченность и иерархическая соподчинённость элементов геологических структур и геофизических полей обращает на себя внимание многих исследователей. Структура вложенности, иерархизации, соподчинения элементов структур имеет некоторые черты подобия [1]. Подобие в форме и иерархической структуре объектов позволяет формализовать процесс типизации соподчинённых составляющих, создать классы моделей геолого-геофизического строения нефтегазоносных месторождений и ловушек нефти и газа. Авторы статьи работают в направлении формализации подходов и разработки алгоритмов распознавания форм структур, типизации форм сейсмических сигналов с целью повышения качества прослеживания сейсмических отражений, структуропостроения, выявления

участков высокоёмких коллекторов и зон максимального нефтегазоаккумуляции на месторождениях нефти и газа Западно-Сибирской плиты (ЗСП). Дискретизация, вложенность и наличие типовых форм в структуре вещества позволяют разработать математические модели нефтегазовых объектов, где для формализации используются закономерности подразделения вещества, формы вложенности структурных фрагментов, их сочетания и последовательности взаимного дополнения. Наличие подобия и вложенности является основой для разработки математических методов их анализа и выделения факторов, благоприятствующих нефтегазоаккумуляции, позволяет разработать новые критерии локализации нефтегазоперспективных объектов и зон высокоёмких коллекторов.