УДК 550.838.2

ИССЛЕДОВАНИЕ ФРАКТАЛЬНЫХ СВОЙСТВ МАССИВА ДАННЫХ МАГНИТНОЙ СЪЕМКИ ПЕЧЕНГСКОГО РУДНОГО РАЙОНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДВУМЕРНОГО ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗА В.А. Любчич

Полярный геофизический институт, 183010, Мурманск, ул. Халтурина, 15, Россия

Статья посвящена исследованию фрактальных свойств массивов геофизических данных, полученных в результате площадных съемок над иерархически организованными геологическими системами. На примере данных магнитной съемки Печенгского рудного района показано, что удобным инструментом для исследования фрактальных свойств массивов геофизических данных является двумерный вейвлет-анализ. Использование вейвлет-анализа позволяет выявлять иерархическую структуру организации рудного района в целом, производить количественные оценки степени неоднородности среды и делать выводы о локальных свойствах геологической системы, например, о рудоперспективности отдельных участков.

Магнитное поле, медно-никелевые руды, вейвлет-анализ, фрактальная размерность, мультифрактальный спектр, показатель сингулярности.

INVESTIGATION OF FRACTAL PROPERTIES OF THE MAGNETIC-SURVEY DATA ARRAY IN THE PECHENGA ORE REGION USING TWO-DIMENSIONAL WAVELET ANALYSIS

V.A. Lyubchich

The article deals with a study of the fractal properties of geophysical-data arrays obtained by areal geophysical works over hierarchically organized geologic systems. It is shown by the example of magnetic-survey data in the Pechenga ore region that two-dimensional wavelet analysis is a useful tool for investigating the fractal properties of geophysical-data arrays. The application of wavelet analysis allows detecting the hierarchical structure of organization of the whole ore region, estimating the degree of the system inhomogeneity, and concluding about the local properties of a geologic system, for example, the ore potential of separate sites.

Magnetic field, copper-nickel ores, wavelet analysis, fractal dimension, multifractal spectrum, local singularity exponent

введение

Многие геологические системы, в частности рудные поля или сети тектонических нарушений, выступающие, как правило, в качестве рудоконтролирующих структур, имеют иерархическую организацию. Другими словами, такие системы обладают фрактальными свойствами, т. е. представляют собой совокупность разномасштабных элементов, причем распределение элементов на более мелком масштабном уровне в статистическом смысле подобно распределению на более крупных масштабах. В качестве иллюстрации можно привести широкоизвестный пример с распределением руд различных металлов. Руды, как известно, в земной коре распределены неравномерно и сконцентрированы в отдельных рудных районах, в пределах которых распределение месторождений и рудопроявлений носит такой же неравномерный характер. На более малых масштабных уровнях в рамках месторождений выделяются отдельные рудные тела и рудные зоны, в пределах которых рудная минерализация также распределена неоднородно. Степень неоднородности распределения характеризуется фрактальной размерностью множества, которая, в отличие от топологической размерности, является дробной величиной. Изучению фрактальных свойств различных геологических систем посвящено множество работ. Например, в книге П.М. Горяинова и Г.Ю. Иванюка [Горяинов, Иванюк, 2001] рассмотрены фрактальные свойства архейских железорудных комплексов Кольского полуострова. В работе [Gumiel et al., 2010] изучены фрактальные кластеры сульфидных штокверков в Иберийском пиритовом поясе. В статьях [McCaffrey, Johnston, 1996; Johnston, McCaffrey, 1996] рассмотрены фрактальные свойства прожилковых систем, в частности, золотосодержащих кварцевых прожилок в горах Сперрин в Северной Ирландии. В статье [Raines, 2008] исследована бифрактальная структура распределения медно-порфировых месторождений в Се-

© В.А. Любчич[⊠], 2017

[™]e-mail: lubchich@yandex.ru

DOI: 10.15372/GiG20170913

верной Америке на разных масштабных уровнях. В работе [Gongwen Wang et al., 2011] фрактальный подход и метод вероятностных нейронных сетей использовались для построения трехмерной геологической модели с целью выявления перспективных участков на обнаружение порфировых и скарновых месторождений молибдена и гидротермальных прожилковых месторождений серебряно-полиметаллических руд в районе Луаньчуань в Китае.

Более того, распределение рудной минерализации носит мультифрактальный характер [Mandelbrot, 1989]. Мультифрактальный формализм описывает не распределение рудных зон как геометрического множества, а распределение рудной минерализации по рудам разных типов, от бедных вкрапленных до сплошных. Так как количество рудных минералов в различных типах руд – разное, то каждый тип оруденения образует свое геометрическое множество с определенной фрактальной размерностью. Мультифрактальному анализу распределения руд в различных месторождениях посвящены работы [Wang Qingfei et al., 2008; Ford, Blenkinsop, 2009]. В первой из них рассмотрены мультифрактальные характеристики распределения главных и сопутствующих элементов в скарновых месторождениях провинции Аньхой в Китае, во второй статье исследована взаимосвязь между мультифрактальным распределением руды по типам и тоннажем рудной массы на примере золоторудных прожилковых месторождений архейского кратона Зимбабве.

Реальные природные фрактальные системы в отличие от абстрактных математических структур не охватывают бесконечное число масштабов, а всегда имеют минимальный элемент и обладают собственным максимальным размером. В том случае, когда характерные размеры (*L*) геофизических установок, например разнос или длина электромагнитной волны, намного меньше максимального размера фрактальной структуры, то при перемещении установки над иерархически организованными геологическими системами будем получать одномерные или двумерные массивы данных, обладающие фрактальными свойствами. При этом фрактальные характеристики массивов геофизических данных будут отражать фрактальные свойства исследуемых геологических систем. Такая ситуация характерна при проведении магнитной съемки.

Удобным инструментом для выделения иерархических структур и изучения фрактальных свойств массивов данных является вейвлет-анализ. В статье [Астафьева, 1996], посвященной изложению основ вейвлет-анализа, в качестве примера приведено исследование фрактальной природы климатического явления Эль-Ниньо. В работе [Burlaga et al., 2006] вейвлет-анализ применялся для изучения мультифрактальной структуры магнитного поля в гелиосферной мантии. В книге [Wavelets..., 2013] представлены различные примеры приложения вейвлет-анализа в науках о Земле.

Данная статья посвящена исследованию фрактальных свойств двумерного массива данных магнитной съемки Печенгского рудного района. В первой части статьи приведена краткая геологическая характеристика Печенгской структуры. Во второй части рассмотрены основные положения вейвлет-анализа, с помощью которого исследовались фрактальные свойства массива геофизических данных. В третьем разделе представлены результаты вейвлет-анализа данных магнитной съемки Печенгского рудного района, позволяющие делать выводы как о фрактальных свойствах Печенгской структуры в целом, так и о локальных особенностях данной системы, характеризующих рудоперспективность отдельных участков.

КРАТКАЯ ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПЕЧЕНГСКОГО РУДНОГО РАЙОНА

Печенгский рудный район расположен в северо-западной части Печенгско-Варзугской рифтогенной структуры, представленной многочисленными интрузивными массивами основных и ультраосновных пород, к которым и приурочены рудопроявления и месторождения медно-никелевых, хромовых, титаномагнетитовых руд и металлов платиноидной группы.

В составе Печенгской серии, в пределах которой находится рудный район, выделяются четыре свиты, нижние части которых представлены толщами осадочных пород, а верхние – покровами вулканитов. Почти все известные медно-никелевые месторождения и рудопроявления района расположены в пределах четвертой, самой мощной, туфогенно-осадочной толщи [Медно-никелевые..., 1985], поэтому она называется продуктивной. Данная свита сложена филлитами, песчаниками, алевролитами, туффитами, туфами. Локализация никеленосных массивов основных и ультраосновных пород в продуктивной толще контролируется складчатыми и разрывными структурами. Для Печенгской структуры характерно наличие сложно разветвленной системы разномасштабных тектонических нарушений, среди которых особенно выделяются разломы северо-западного и северо-восточного направлений, а также продольные межпластовые тектонические зоны, проходящие через все рудное поле. Эти тектонические зоны являются важнейшими рудоконтролирующими структурами, определяющими размещение никеленосных массивов и локализацию богатых сплошных и брекчиевидных руд. Интрузивные массивы сложены в основном серпентинитами и серпентинизированными перидотитами, содержащими сульфидную вкрапленность, а также пироксенитами и габбро. Основные медно-никелевые месторождения Печенгского рудного района сконцентрированы в двух рудных узлах. Линейно вытянутый Западный рудный узел представлен месторождениями Каула, Промежуточное, Фланговое, Верхнее, Семилетка. Строение месторождения Каула обусловлено сочетанием синклинальной складки и Главной межпластовой тектонической зоны. По простиранию рудная зона обладает волнообразно-изогнутой формой, повторяющей большие складки, на флангах она сложно ветвится. В пределах месторождения зона представлена богатыми медно-никелевыми рудами, и на всем ее протяжении присутствуют жилы сплошных руд, локализованные вдоль трещин отслоения в складчатых филлитах.

На продолжении Главной межпластовой тектонической зоны восточнее Каулы расположены другие месторождения Западного узла, включающие рудные тела нескольких никеленосных дифференцированных интрузивов основных — ультраосновных пород. Тектонические нарушения объединяют отдельные интрузивы и связанные с ними рудные тела в единую сложно разветвленную структуру. В рудных телах данных месторождений основную часть составляют вкрапленные руды, но на участках сопряжения тектонических нарушений с рудоносными интрузивами отмечаются сплошные и брекчиевидные руды.

Восточный рудный узел, включающий месторождения Жданова, Онки, представлен комплексом взаимосвязанных рудных тел линзо- и пластообразной формы, залегающих в приподошвенной части крупного сложнодислоцированного Главного массива и ряда мелких интрузивов. Главный массив является дифференцированным интрузивом с раздувом в центре, сложенным из серпентинизированных перидотитов и пироксеновых оливинитов с вкрапленной сульфидной минерализацией, безрудных серпентинизированных перидотитов, пироксенитов и габбро. Рудоконтролирующими структурами в Восточном рудном узле выступают крутые синклинальные складки, в которых локализуются рудоносные интрузивы, а также сложно разветвленная межпластовая тектоническая зона, выраженная брекчированием и рассланцеванием перидотитов с вкрапленным медно-никелевым оруденением, а на отдельных участках выполненная сплошными сульфидными рудами.

В центральной части рудного поля размещены никеленосные массивы Соукер, Мирона, Киерджипор и другие. В этих массивах вкрапленное оруденение приурочено к прогибам подошвы массивов, распределение сульфидной вкрапленности является неравномерным.

В Печенгском рудном районе медно-никелевые руды представлены четырьмя основными типами: вкрапленными рудами в серпентинитах, брекчиевидными рудами, сплошными сульфидными рудами, прожилково-вкрапленными рудами в сланцах [Медно-никелевые..., 1985]. Вкрапленные руды подразделяются на рядовые с содержанием сульфидов не более 25—30 % и богатые с содержанием рудных минералов до 60—70 %. Содержание никеля в бедных вкрапленных рудах составляет 1.0—1.5 %, в богатых вкрапленных рудах оно достигает 6 %. Брекчиевидные руды состоят из обломков серпентинитов, филлитов, туффитов, сцементированных сульфидами, содержание которых может подниматься до 80 %. Сплошные руды на 60-80 % состоят из пирротина, а также пентландита, халькопирита. Содержание никеля в сплошных и брекчиевидных рудах наиболее высокое и достигает 10—12 %. Содержание меди во всех типах руд изменяется в широком диапазоне от десятых долей процента до 13 %.

Наличие четырех вулканогенно-осадочных толщ демонстрирует признаки иерархической организации Печенгской структуры. Кроме того, размещение никеленосных массивов основных-ультраосновных пород и связанных с ними рудных тел контролируется сложно разветвленной иерархической системой тектонических нарушений разного масштаба. Таким образом, представляется целесообразным применить фрактальный подход к исследованию особенностей геологического строения Печенгского рудного района.

ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗ МАССИВОВ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Печенгский рудный район детально изучен различными геофизическими методами. Однако очень высокая электропроводность филлитовых толщ значительно снижает эффективность таких геоэлектрических методов, как электропрофилирование на постоянном токе, метод вызванной поляризации. Методом переходных процессов и индуктивным электропрофилированием данный район исследован недостаточно в силу несовершенства аппаратуры в 1960—1980 годы, когда проводились широкие площадные геофизические исследования района. Поэтому наиболее информативными и наиболее полно охватывающими территорию Печенгской структуры являются данные магниторазведки.

Главная масса медно-никелевых руд размещается в серпентинитах и серпентинизированных перидотитах. Основными рудными минералами во всех типах руд являются магнитный пирротин, пентландит и халькопирит, в оруденелых серпентинитах к ним относится и магнетит. Вследствие чего размещение медно-никелевых рудных зон хорошо отображается в магнитном поле. На рис. 1 представлена сводная карта изолиний вертикальной составляющей напряженности магнитного поля ΔZ (A/м) Печенг-



Рис. 1. Карта изолиний вертикальной составляющей магнитного поля ΔZ Печенгского рудного района.

Черными кружками на карте обозначены медно-никелевые месторождения: а — Каула, б — Семилетка, в — Жданова—Онки, г — Киерджипор, д — Соукер.

ского рудного района [Чалых и др., 1976]. Все значения приведены к единому уровню относительно контрольного пункта в южной части района. Видно, что в центральной части Печенгской структуры отчетливо выделяется в магнитном поле знакопеременной магнитной аномалией продуктивная туфогенно-осадочная толща. Интенсивными магнитными аномалиями отмечаются также и подстилающие туфогенно-осадочные толщи в северной части района. Но в отличие от них магнитные аномалии, связанные с продуктивной толщей, характеризуются более неоднородной структурой.

При проведении площадных магнитных съемок над такими иерархическими геологическими системами, как Печенгский рудный район, полученные двумерные массивы геофизических данных могут обладать фрактальными свойствами. Как показано в работе [Астафьева, 1996], для исследования фрактальных свойств массивов данных удобно использовать вейвлет-анализ.

Вейвлет-преобразование одномерного сигнала представляет собой его разложение по базису солитоноподобных функций – вейвлетов $\psi_{ik}(t)$:

$$f(t) = \sum_{j,k=-\infty}^{+\infty} c_{jk} \psi_{jk}(t), \qquad (1)$$

где c_{jk} — коэффициент вейвлет-преобразования. Функция $\psi(t)$ является вейвлетом, если, во-первых, ее среднее значение (интеграл по всей оси) равно нулю, и, во-вторых, она быстро убывает при $t \to \pm \infty$. Базис, по которому раскладывается сигнал f(t), конструируется из данного вейвлета $\psi(t)$ с помощью масштабных преобразований и сдвигов:

$$\psi_{ik}(t) = 2^{j/2} \psi(2^j t - k)$$
.

Интегральное вейвлет-преобразование одномерного сигнала можно записать в следующем виде:

$$Wf(b,a) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi^*\left(\frac{t-b}{a}\right) dt , \quad (b,a) \in \mathbb{R},$$
(2)

где ψ^* — комплексно сопряженная функция, *b* — параметр сдвига анализирующего вейвлета вдоль координатной оси, *a* — масштабный параметр растяжения вейвлета. Этот параметр играет такую же роль, как период *T* в преобразовании Фурье. Тогда коэффициенты *c*_{*i*} разложения (1) можно определить как

$$c_{jk} = Wf\left(\frac{k}{2^j}, \frac{1}{2^j}\right).$$

Вейвлет-разложение обеспечивает своеобразную двумерную развертку исследуемого сигнала в физическом, вдоль координаты, и частотном пространствах, при этом частота и координата рассматриваются как независимые переменные.

Вейвлет-анализ пространственных и временных рядов данных обладает неоспоримыми преимуществами по сравнению с традиционным спектральным анализом, основанным на преобразовании Фурье исследуемого сигнала. Во-первых, вейвлет-преобразование обеспечивает хорошую частотно-временную локализацию информации об особенностях сигнала. Дело в том, что базисные функции вейвлет-преобразования локализованы не только во временном пространстве, но и в частотном. При фиксированном значении параметра сдвига *b* мы получаем частотную развертку сигнала в окрестности данной точки. Если задан масштабный параметр *a*, то задана некоторая частота ω_0/a , вокруг которой локализован фурье-образ растянутого вейвлета. Так как свертка функций во временном пространстве эквивалентна перемножению их спектров в частотном, то из спектра анализируемого сигнала вырезается область частот, близких к ω_0/a , и мы получаем информацию о временной эволюции изучаемой функции на данных частотах. Кроме того, вейвлет-преобразование автоматически обладает подвижным частотно-временным окном, с узким временным интервалом на высоких частотах, которым соответствуют малые значения параметра *a*, и с широким на низких.

Во-вторых, вейвлет-преобразование более наглядно представляет полученные результаты и позволяет рассмотреть особенности сигнала на различных масштабных уровнях, динамику их изменений вдоль масштабной и координатной осей. Причем основная информация об особенностях сигнала сосредоточена в так называемом скелетоне вейвлет-преобразования — множестве точек на плоскости (*b*,*a*), в которых находятся локальные максимумы коэффициентов вейвлет-преобразования.

В-третьих, базис вейвлет-преобразования является автомодельным, так как он конструируется из одного вейвлета $\psi(t)$ посредством масштабных растяжений и сдвигов. Свойство самоподобия базисных функций позволяет успешно применять вейвлет-преобразование для анализа не только гармонических сигналов, но и сингулярных, фрактальных рядов, имеющих иерархическую структуру. Для таких рядов распределение локальных максимумов скелетона вейвлет-преобразования также будет иметь иерархическое строение.

Важной характеристикой фрактальных свойств массивов геофизических данных является фрактальная размерность d_f [Бобров и др., 2004], которая, в отличие от топологической размерности d, является дробной величиной. Иерархически организованные геологические системы отличаются крайне неоднородным строением, поэтому массивы данных, полученные в результате профильных геофизических работ над такими системами, также характеризуются высокой степенью неоднородности. Фрактальная размерность является количественной оценкой степени неоднородности данных. Таким образом, в физическом отношении эта характеристика обусловлена неоднородностью исследуемой геологической системы и контрастностью физических свойств горных пород. Чем резче изменяются физические свойства горных пород, тем изломаннее будут профильные кривые, тем выше будет фрактальная размерность массива данных. Оценить фрактальную размерность d_f можно по скорости ветвления хребтов скелетона:

$$d_f = \ln(N(a)) / \ln(a),$$

где N(a) — число максимумов вейвлет-преобразования на данном масштабе a. Значение d_f определяется по тангенсу угла наклона графика N(a) в двойном логарифмическом масштабе.

Свойства автомодельности базиса и частотно-временной локализации вейвлет-преобразования позволяют исследовать локальные неоднородности сигнала. Если анализируемый ряд имеет в некоторой точке сингулярность с локальным показателем α_l

$$|f(t+t_0)-f(t)|=c|t_0|^{\alpha_l}$$

где α_l < 1, то коэффициенты вейвлет-преобразования ряда в окрестности этой точки должны подчиняться соотношению [Астафьева, 1996]:

$$Wf(t_0,a) \approx c a^{\alpha_l - d/2 + 1}$$
 при $a \to 0$,

где *d* — топологическая размерность массива геофизических данных. Анализируя графики зависимости коэффициентов вейвлет-преобразования от масштабного параметра *a* вдоль отдельных хребтов скелетона, по тангенсу угла наклона графика в двойном логарифмическом масштабе можно определить локальный показатель сингулярности α_i для рассматриваемой неоднородности массива данных.

Кроме того, с помощью скелетона вейвлет-преобразования возможно вычислить так называемую последовательность показателей масс $\tau(q)$, характеризующую мультифрактальные свойства массива геофизических данных:

$$\tau(q) = \ln\left(\sum_{i} |Wf(b_{i},a)|^{q}\right) / \ln(a),$$

где суммирование коэффициентов непрерывного вейвлет-преобразования $Wf(b_{i},a)$ производится по локальным максимумам на данном масштабе *a*. Однако более наглядной характеристикой является спектр сингулярности или мультифрактальный спектр ряда $f(\alpha)$ [Федер, 1991], вычисляемый из последовательности показателей масс $\tau(q)$ с помощью преобразования Лежандра:

$$\alpha(q) = -\frac{d\tau(q)}{dq},$$

$$f(\alpha(q)) = q\alpha(q) + \tau(q).$$

Показатель Гельдера α фиксирует определенное значение мультифрактальной меры, а соответствующее значение спектра сингулярности $f(\alpha)$ определяет фрактальную размерность множества ячеек с заданным значением мультифрактальной меры. С физической точки зрения мультифрактальный спектр характеризует распределение рудных минералов по типам руд. В роли мультифрактальной меры выступает количество рудных минералов, в том числе магнитных, что напрямую связано с интенсивностью магнитных аномалий. Таким образом, при анализе мультифрактальных свойств двумерного массива данных магнитной съемки показатель Гельдера α выделяет множество точек с одинаковым уровнем напряженности магнитного поля, обусловленным определенной концентрацией магнитных рудных минералов, а значение спектра $f(\alpha)$ показывает фрактальную размерность данного множества.

Функция $f(\alpha)$ имеет колоколообразную форму, чем шире область определения функции, тем разнообразнее представлены различные типы оруденения, от бедных вкрапленных до богатых сплошных руд. В случае же преобладания одного типа оруденения мультифрактальный спектр суживается и имеет пикообразную форму.

В двумерном случае коэффициенты вейвлет-преобразования зависят от четырех параметров – двух параметров сдвига и двух масштабных параметров. Но так как распределение магнитного поля в Печенгском рудном районе имеет в целом изотропный характер, то для удобства рассмотрения в данной работе анализировались только те коэффициенты, у которых масштабные параметры по разным осям совпадали.

РЕЗУЛЬТАТЫ ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗА ДАННЫХ МАГНИТНОЙ СЪЕМКИ ПЕЧЕНГСКОГО РУДНОГО РАЙОНА

В результате оцифровки карты изолиний магнитного поля в пределах Печенгского рудного района был получен двумерный массив геофизических данных размером 2048 × 2048 точек. В тех районах, где магнитная съемка не проводилась (на краях планшета), массив данных дополнялся фоновыми величинами, равными крайним измеренным значениям магнитного поля на данной строке массива.



Рис. 2. Расположение интенсивных локальных максимумов двумерного вейвлет-преобразования массива данных магнитной съемки на разных масштабных уровнях *a* = 2^{*j*}:

a—*j* = 1, *б*—*j* = 2, *в*—*j* = 3, *г*—*j* = 4. Красными крестиками обозначены местоположения интенсивных локальных максимумов двумерного вейвлет-преобразования.

Так как аномально намагниченные объекты создают, как правило, знакопеременные аномалии магнитного поля, то для анализа массива данных магнитной съемки использовался вейвлет sym4 под названием симлет [Смоленцев, 2005]. Симлеты обладают компактным носителем, диапазоном координат, за пределами которого функция $\psi(t)$ затухает. Это свойство полезно при анализе ограниченных массивов данных. Во-вторых, симлеты обладают наиболее симметричной формой, которая соответствует типичной магнитной аномалии.

Линейные размеры массива геофизических данных позволили провести анализ коэффициентов вейвлет-разложения на восьми пространственных масштабах $a = 2^j$, j = 1—8. Так как общее количество локальных максимумов вейвлет-преобразования, обусловленных в основном незначительными вариациями магнитного поля, очень велико и их распределение в пределах планшета геофизических данных носит достаточно равномерный характер, то целесообразно рассматривать только интенсивные локальные максимумы, амплитуда которых выше определенного порога. Пороговое значение выбирается таким образом, чтобы подавить локальные максимумы, вызванные малыми изменениями магнитного поля.

На рис. 2 приведено распределение интенсивных локальных максимумов вейвлет-преобразования на масштабах при j = 1—4. Как видно из рисунка, основная масса интенсивных локальных максимумов вейвлет-преобразования на малых масштабах (j = 1) группируется в пределах четвертой продуктивной толщи Печенгской структуры, в местах расположения никеленосных интрузивных массивов. На более крупных масштабах интенсивные локальные максимумы вейвлет-преобразования сосредоточены кроме области размещения продуктивной толщи также и в зоне подстилающих туфогенно-осадочных толщ в северной части исследуемого района, и в зоне Южно-Печенгской структуры, представленной сланцами

и амфиболитами. Для j > 4 растянутые вейвлеты охватывают очень большие площади массива данных, поэтому количество локальных максимумов вейвлет-преобразования уменьшается, и они более равномерно распределяются по территории рудного района.

Если исследовать локальные показатели сингулярности α, для отдельных хребтов скелетона вейвлет-преобразования, характеризующие степень сингулярности поля в данной точке пространства, то можно обнаружить интересную закономерность. Наименьшие значения показателя α_{h} что свидетельствует о значительной неоднородности поля и фрактальных свойствах среды, соответствуют Западному рудному узлу, характеризующемуся сложной структурой рудоконтролирующей Главной тектонической зоны и представленному богатыми медно-никелевыми рудами. Так, в районе месторождения Каула среднее значение показателя составляет 0.51 ± 0.06 , а для месторождения Семилетка – 0.66 ± 0.10 . Затем по степени неоднородности поля выделяется Восточный рудный узел, также характеризующийся сложнодислоцированным расслоенным Главным массивом, в пределах которого распределение рудных тел контролируется той же разветвленной Главной межпластовой тектонической зоной. Среднее значение локального показателя сингулярности для месторождений Жданова—Онки составляет 0.87 ± 0.06. Для месторождений центральной части рудного поля, представленных вкрапленными рудами, значения показателя близки к единице, так для участка Киерджипор -0.94 ± 0.05 , для участка Соукер -0.99 ± 0.09 , что показывает относительную однородность поля и меньшую степень фрактальности среды. В качестве погрешностей указано среднеквадратическое отклонение по группам значений локальных показателей сингулярности, расположенных в пределах месторождений. Примеры графиков зависимости амплитуды максимумов вейвлет-преобразования от значения масштабного параметра а в двойном логарифмическом масштабе для разных участков приведены на рис. 3.

Распределение значений локального показателя сингулярности α, по площади Печенгского рудного района иллюстрирует рис. 4. За основу принята схематическая геологическая карта района из монографии [Медно-никелевые..., 1985]. Как указывалось выше, интенсивные локальные максимумы вейвлет-преобразования на малых масштабах расположены в основном в пределах четвертой продуктивной толщи Печенгской структуры. Уровни значений локального показателя сингулярности α, рассчитанные для соответствующих хребтов скелетона, показаны на рис. 4 цветными изолиниями. Видно, что наименьшие значения показателя относятся к Западному рудному узлу, представленному такими медно-никелевыми месторождениями, как Каула, Семилетка и другие. Соответствующие значения показателя находятся в пределах от 0.5 до 0.8. Месторождения Жданова, Онки, относящиеся к Восточному рудному узлу, и месторождения центральной части рудного поля Киерджипор, Соукер характеризуются повышенным уровнем значений локального показателя сингулярности, в среднем 0.90—0.97. Определенный интерес вызывает аномальная зона с пониженными значениями показателя, расположенная в восточной части Печенгского рудного поля в районе субширотного Луотнинского разлома и южнее, тем более что в этой области отмечались рудопроявления медно-никелевых руд. Более детальное изучение данной аномальной зоны требует проведения дополнительных геофизических и геологических работ, что составляет предмет будущих исследований. Отдельные аномальные области пониженных значений локального показателя сингулярности α, отмечаются также в пределах подстилающих туфогенно-осадочных толщ и в районе Южно-Печенгской структуры, но для этих зон характерно небольшое количество интенсивных локальных максимумов вейвлет-преобразования на малых масштабах.



Рис. 3. Примеры графиков зависимости амплитуды максимумов вейвлет-преобразования от значения масштабного параметра *а* вдоль отдельных хребтов скелетона вейвлет-преобразования:

a — участок Каула, локальный показатель сингулярности $\alpha_l = 0.53 \pm 0.11$; δ — участок Семилетка, $\alpha_l = 0.65 \pm 0.16$; s — участок Жданова—Онки, $\alpha_l = 0.87 \pm 0.10$; c — участок Киерджипор, $\alpha_l = 0.96 \pm 0.04$; δ — участок Соукер, $\alpha_l = 0.94 \pm 0.12$.



Рис. 4. Распределение значений локального показателя сингулярности α₁ по площади Печенгского рудного района.

Цифрами на схематической геологической карте обозначены: 1 — плагиопорфириты; 2 — ультраосновные и основные породы; 3 — эффузивные диабазы, метадиабазы, туфы; 4 — филлиты, туффиты; 5 — доломиты, кварциты; 6 — базальные конгломераты; 7 — сланцы; 8 — рассланцованные метадиабазы; 9 — сланцеватые амфиболиты; 10 — граниты; 11 — гранодиориты; 12 — железорудная серия; 13 — гранат-амфиболовые гнейсы; 14 — олигоклазовые гнейсограниты; 15 — гиперстеновые гнейсограниты; 16 — гранат-биотитовые гнейсы; 17 — нерасчлененный комплекс слюдяных гнейсов; 18 — комплекс древнейших гнейсогранодиоритов; 19 — разрывные нарушения; 20 — медно-никелевые месторождения. Буквами на рисунке обозначены медно-никелевые месторождения: а — Каула, б — Семилетка, в — Жданова—Онки, г — Киерджипор, д — Соукер.

Таким образом, по значениям локального показателя сингулярности α_l можно судить о рудоперспективности отдельных участков. Месторождения с наличием богатых сплошных и брекчиевидных руд характеризуются, как правило, сильнонеоднородным магнитным полем, что и демонстрируется пониженными значениями показателя сингулярности. Для рудопроявлений и месторождений вкрапленных руд магнитное поле имеет более спокойный характер, и значения показателя сингулярности близки к единице.



Рис. 5. Зависимость числа максимумов вейвлетпреобразования от масштабного параметра *a*.



Рис. 6. Мультифрактальный спектр распределения значений магнитного поля.

Фрактальная размерность массива данных магнитной съемки, оцененная по углу наклона графика в двойном логарифмическом масштабе, $d_f = 1.60 \pm 0.03$.

Для оценки фрактальных характеристик Печенгской структуры как геологической системы в целом необходимо проанализировать коэффициенты вейвлет-преобразования массива геофизических данных на как можно большем наборе масштабов. Поэтому для вычисления коэффициентов использовалось интегральное вейвлет-преобразование (2). При этом масштабный параметр *а* выбирался по более густой сетке, т. е. показатель степени *j* был не только целым, но и дробным числом.

На рис. 5 приведен график зависимости числа максимумов вейвлет-преобразования N(a) от масштабного параметра a в двойном логарифмическом масштабе. Фрактальная размерность d_{f^2} оцененная по скорости ветвления хребтов скелетона, составляет 1.60 ± 0.03. Погрешность рассчитана методом наименьших квадратов при линейной интерполяции графика в двойном логарифмическом масштабе. Данное значение фрактальной размерности свидетельствует о существенной неоднородности магнитного поля в пределах Печенгского рудного района и сложноиерархической, фрактальной структуре организации среды.

Кроме того, значительная ширина спектра сингулярности $f(\alpha)$, изображенного на рис. 6, говорит о мультифрактальном характере распределения неоднородностей. С геологической точки зрения можно говорить о значительном диапазоне концентраций медно-никелевого оруденения в различных рудных телах, от вкрапленной минерализации до богатых сплошных руд. Вытянутую левую ветвь мультифрактального спектра в сторону меньших значений показателя Гельдера α можно интерпретировать как свидетельство преобладания вкрапленных руд в распределении рудной минерализации в Печенгском рудном районе.

Таким образом, можно сделать вывод, что двумерный вейвлет-анализ является удобным инструментом изучения фрактальных свойств массивов геофизических данных, позволяющим выявлять иерархическую структуру организации геологической системы в целом и делать выводы о локальных свойствах данной системы, например, рудоперспективности отдельных участков.

выводы

Результаты проведенного анализа площадной магнитной съемки Печенгского рудного района демонстрируют фрактальные свойства массива геофизических данных, что свидетельствует об иерархической организации геологического строения Печенгской структуры.

Удобным инструментом для изучения фрактальных свойств массивов геофизических данных является двумерный вейвлет-анализ, позволяющий выявлять иерархическую структуру организации геологической системы в целом и производить количественные оценки степени неоднородности среды.

Кроме того, вейвлет-анализ позволяет делать выводы о локальных свойствах геологической системы, а именно, рудоперспективности отдельных участков. Количественной характеристикой неоднородности среды в данной точке пространства может служить локальный показатель сингулярности α_{l} , рассчитывающийся для отдельных хребтов скелетона вейвлет-преобразования. Было установлено, что наименьшие значения локального показателя сингулярности соответствовали медно-никелевым месторождениям Западного рудного узла, обладающим сложной структурой и представленным богатыми медно-никелевыми рудами. Перспективные месторождения Жданова—Онки, относящиеся к Восточному рудному узлу, также характеризуются относительно пониженными значениями локального показателя сингулярности. Для месторождений же центральной части продуктивной толщи Печенгского рудного района, для которых характерны вкрапленные руды, локальный показатель сингулярности близок к единице.

ЛИТЕРАТУРА

Астафьева Н.М. Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения // Успехи физических наук, 1996, т. 166 (11), с. 1145—1170.

Бобров Н.Ю., Крылов С.С., Любчич В.А. Фрактальный анализ рядов дипольного электромагнитного профилирования на Печегубском и Комсомольском месторождениях железистых кварцитов // Вопросы геофизики, 2004, № 36 (Ученые записки СПбГУ, № 434), с. 160—167.

Горяинов П.М., Иванюк Г.Ю. Самоорганизация минеральных систем. Синергетические принципы геологических исследований. М., Изд-во Геос, 2001, 312 с.

Медно-никелевые месторождения Балтийского щита / Под ред. Г.И. Горбунова, Х. Папунена. Л., Наука, 1985, 329 с.

Смоленцев Н.К. Основы теории вейвлетов. Вейвлеты в МАТLAB. М., Изд-во ДМК Пресс, 2005, 304 с.

Федер Е. Фракталы. М., Мир, 1991, 260 с.

Чалых Е.Д., Колпаков Н.И., Спиров В.Н. Отчет по составлению геолого-структурной и прогнозной на никель карт. М-б 1:50000 Печенгско-Аллареченского района. Апатиты, 1976.

Burlaga L.F., Ness N.F., Acũna M.H. Multiscale structure of magnetic fields in the heliosheath // J. Geophys. Res.: Space Physics, 2006, v. 111, № A9, A09112 | DOI: 10.1029/2006JA011850.

Ford A., Blenkinsop T.G. An expanded de Wijs model for multifractal analysis of mineral production data // Miner. Depos., 2009, v. 44, № 2, p. 233–240.

Gongwen Wang, Shouting Zhang, Changhai Yan, Yaowu Song, Yue Sun, Dong Li, Fengming Xu. Mineral potential targeting and resource assessment based on 3D geological modeling in Luanchuan region, China // Comput. Geosci., 2011, v. 37(12), p. 1976—1988.

Gumiel P., Sanderson D.J., Arias M., Roberts S., Martin-Izard A. Analysis of the fractal clustering of ore deposits in the Spanish Iberian Pyrite Belt // Ore Geol. Rev., 2010, v. 38, № 4, p. 307—318.

Johnston J.D., McCaffrey K.J.W. Fractal properties of vein systems and the variation of scaling relationships with mechanism // J. Struct. Geol., 1996, v. 18(2), p. 349—358.

Mandelbrot B.B. Multifractal measures, especially for geophysicists // PAGEOPH, 1989, v. 131, № 1/2, p. 5-42.

McCaffrey K.J.W., Johnston J.D. Fractal analysis of a mineralized vein deposit: Curraghinalt gold deposit, County Tyrone // Miner. Deposita, 1996, v. 31, p. 52—58.

Raines G.L. Are fractal dimensions of the spatial distribution of mineral deposits meaningful? // Nat. Resour. Res., 2008, v. 17, № 2, p. 87—97.

Wang Qingfei, Deng Jun, Wan Li, Zhao Jie, Gong Qingjie, Yang Liqiang, Zhou Lei, Zhang Zhijun. Multifractal analysis of element distribution in skarn-type deposits in the Shizishan Orefield, Tongling Area, Anhui Province, China // ACTA Geologica Sinica (English edition), 2008, v. 82, № 4, p. 896—905.

Wavelets and fractals in Earth system sciences / Eds. E. Chandrasekhar, V.P. Dimri, V.M. Gadre. Boca Raton, London, New York, CRC Press, Taylor & Francis Group, 2013, 306 p.

Рекомендована к печати 8 февраля 2017 г. А.Д. Дучковым Поступила в редакцию 10 марта 2016 г., после доработки — 18 октября 2016 г.