

УДК 550.838.2, 550.837.32

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДВУМЕРНОГО ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ФРАКТАЛЬНЫХ СВОЙСТВ МАССИВОВ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ДАННЫХ НА ПРИМЕРЕ МАГНИТНЫХ И ЭЛЕКТРОРАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТ В МОНЧЕГОРСКОМ РУДНОМ РАЙОНЕ

© 2018 г. В.А. Любчич

Полярный геофизический институт, г. Мурманск, Россия

Исследованы фрактальные свойства массивов геофизических данных, полученных при проведении площадных магнитных съемок и электроразведочных работ методом мелкомасштабного заряда (ММЗ) в Мончегорском рудном районе. Рудный район расположен в центральной части Печенгско-Варзугской рифтогенной структуры, что обуславливает наличие в нем иерархически организованной системы тектонических нарушений разного масштаба и направления. Главные структурообразующие продольные осевые разломы рифтогенной зоны северо-западного направления и трансформные разломы северо-восточного направления совместно с оперяющими тектоническими зонами меньшего масштаба, контролируя размещение интрузивных массивов основных и ультраосновных пород, определяют структуру месторождений и рудопроявлений богатых эпигенетических медно-никелевых руд и формируют единую Мончегорскую рудно-магматическую систему центрального типа.

Иерархическая организация геологических систем определяет фрактальные свойства массивов геофизических данных, получаемых при проведении площадных измерений над такими системами. Так, сеть тектонических нарушений отображается в геофизических полях множеством аномальных зон повышенной электропроводности, фрактальная размерность которого, оцениваемая клеточным методом, составляет $d_f=1.38\pm 0.02$. Широкое распространение магнитных рудных минералов, таких как пирротин и магнетит, способствует четкому отображению рудных зон в магнитном поле. С использованием результатов проведенной в Мончегорском рудном районе магнитной съемки показано, что удобным инструментом для исследования фрактальных свойств массивов геофизических данных является двумерный вейвлет-анализ, позволяющий выявлять иерархическую структуру организации геологической системы в целом и делать выводы о ее локальных свойствах, например, о рудоперспективности отдельных участков. Количественной характеристикой неоднородности магнитного поля в пределах исследуемого участка может служить среднее значение локальных показателей сингулярности α_i , рассчитанных для отдельных хребтов скелетона вейвлет-преобразования. Для участков, перспективных на обнаружение богатых эпигенетических медно-никелевых руд, для которых характерно крайне неоднородное магнитное поле, локальные показатели сингулярности имеют пониженные значения. Для участков с преимущественно редко- и средневкрапленным оруденением с более спокойным магнитным полем локальные показатели сингулярности близки к единице.

Ключевые слова: медно-никелевые руды, тектонический разлом, магнитное поле, метод мелкомасштабного заряда, фрактальная размерность, вейвлет-преобразование, локальный показатель сингулярности.

Введение

Приуроченность Мончегорского рудного района к центральной части Печенгско-Варзугской рифтогенной структуры обуславливает широкое распространение в районе тектонических нарушений разного масштаба и направления, контролирующих размещение интрузивных массивов основных и ультраосновных пород и геометрию

распределения богатых эпигенетических медно-никелевых руд метаморфогенного типа. Известно, что такие геологические системы, как рудные поля или сети тектонических нарушений, являющиеся рудоконтролирующими структурами, имеют иерархическую организацию. Другими словами, такие системы обладают фрактальными свойствами, т.е. представляют собой совокупность неоднородно распределенных, разномасштабных элементов, причем распределение элементов на более мелком масштабном уровне в статистическом смысле подобно распределению на более крупных масштабах. Степень неоднородности распределения характеризуется фрактальной размерностью множества d_f , которая, в отличие от топологической размерности d , является дробной величиной.

Изучению фрактальных свойств разных рудных систем посвящено множество работ. Например, в книге П.М. Горяинова и Г.Ю. Иванюка [2001] рассмотрены фрактальные свойства архейских железорудных комплексов Кольского полуострова; в работе [Gumiel et al., 2010] – фрактальные кластеры сульфидных штокверков в Иберийском пиритовом поясе; в статье [McCaffrey, Johnston, 1996] – фрактальные свойства прожилковых систем, а именно, золотосодержащих кварцевых прожилков в горах Сперрин в Северной Ирландии. В статье [Raines, 2008] исследована бифрактальная структура распределения медно-порфириновых месторождений в Северной Америке – наличие двух различающихся фрактальных размерностей распределения месторождений на локальном и региональном масштабных уровнях. Названные работы подтверждают, что фрактальными свойствами обладают различные рудные системы, поэтому применение фрактального подхода к исследованию иерархической структуры организации Мончегорского рудного района представляется целесообразным.

При проведении геофизических работ над иерархически организованными геологическими системами в случаях точечных измерений, например, при магнитной съемке, формируются одномерные или двумерные массивы геофизических данных, обладающие фрактальными свойствами. При этом фрактальные характеристики массивов получаемых данных отражают фрактальные свойства исследуемых геологических систем. Удобным инструментом для выделения иерархических структур и изучения фрактальных свойств массивов данных представляется вейвлет-анализ.

Применению фрактальных методов в различных областях геофизики посвящено большое количество публикаций (см., например, [Mandelbrot, 1982; Turcotte, 1992; Feder, 1988; Fractal ..., 2005; Pilkington, Todoeschuck, 1993; Maus, Dimri, 1994, 1995; Bansal, Dimri, 1999, 2005; Fedi, Quarta, Sanits, 1997; Wavelets ..., 2013; Астафьева, 1996; Chamoli, Dimri, 2007; Chamoli, Srivastava, Dimri, 2006; Chamoli et al., 2011] и др.). Предлагаемые в перечисленных работах методы и приемы обработки пространственных рядов геофизических данных были использованы автором данной статьи при анализе фрактальных свойств двумерного массива данных магнитной съемки, проведенной в Мончегорском рудном районе.

В первой части статьи приведена краткая геологическая характеристика исследуемого района; во второй – результаты геофизических работ, проводившихся в нем в 1994–2003 гг.; в третьей рассмотрены основные положения вейвлет-анализа, с помощью которого исследовались фрактальные свойства массива геофизических данных. В четвертом разделе представлены результаты вейвлет-анализа данных магнитной съемки, позволяющие сделать выводы о локальных особенностях иерархически организованной Мончегорской рудно-магматической структуры и оценить рудоперспективность ее отдельных участков.

Геологическая характеристика Мончегорского рудного района

Мончегорский рудный район расположен в центральной части раннепротерозойской Печенгско-Варзугской рифтогенной структуры, пересекающей Кольский полуостров с северо-запада на юго-восток, которая представлена многочисленными интрузивными массивами основных и ультраосновных пород. Схематическая геологическая карта центральной части исследуемого района, на которую вынесены результаты анализируемых автором геофизических работ, приведена на рис. 1.

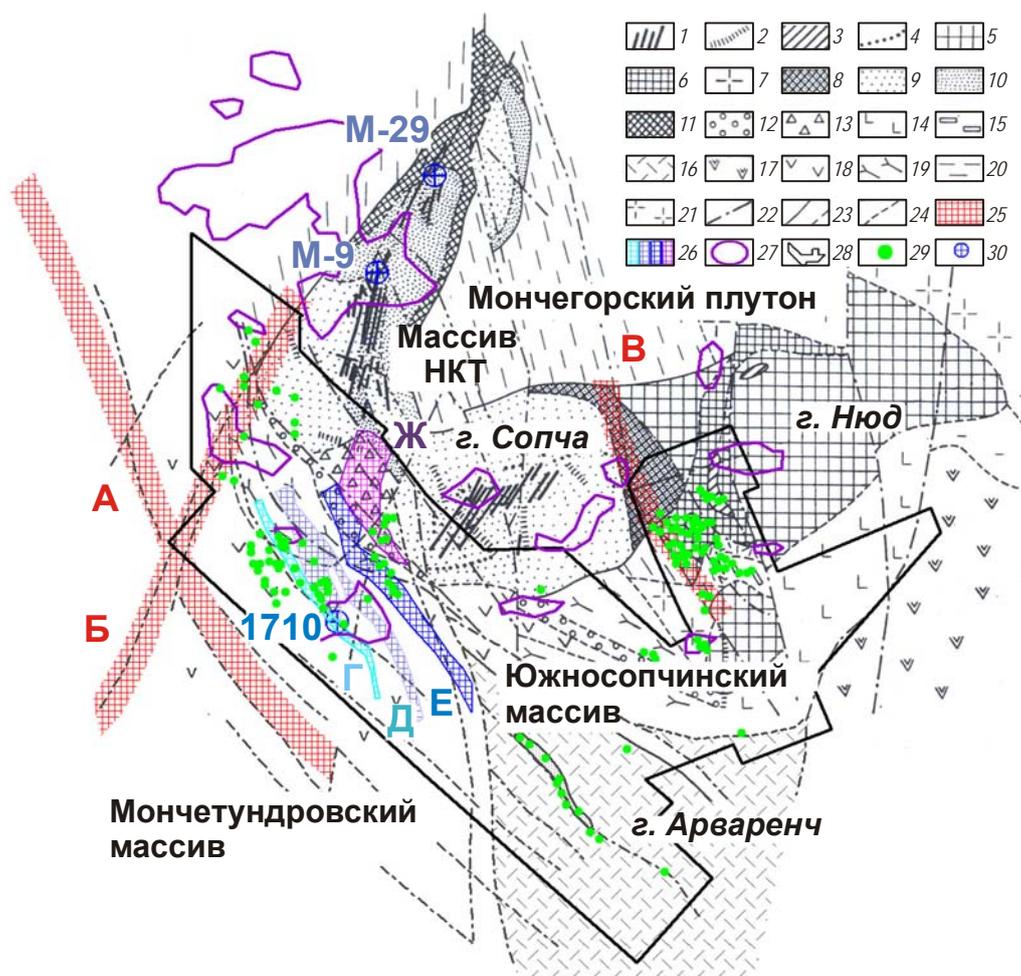


Рис. 1. Схематическая геологическая карта центральной части Мончегорского рудного района. Расшифровка условных обозначений 1–30 приведена в тексте

Fig. 1. The schematic geologic map of the central part of the Monchegorsk ore region. Decoding of symbols 1–30 is given in the text

На карте приняты следующие условные обозначения: 1 – сульфидные медно-никелевые жилы массивов Ниттис–Кумужья–Травяная (НКТ) и Сопча; 2 – дайки диабазов и лампрофиров; 3 – породы “критического горизонта” массива Ньюд; 4 – рудные пласты массива Сопча; 5–7 – нориты: лейко-мезократовые (5), меланократовые (6), оливиновые (7); 8–9 – пироксениты: плагиоклазовые (8), бронзититы (9); 10 – зоны чередования пироксенитов, оливиновых пироксенитов и перидотитов; 11 – перидотиты

(гарцбургиты); 12 – зона чередования пироксенитов, перидотитов, норитов, рассеченная многочисленными жилами основных и кислых пород; 13 – оливиниты; 14 – метаморфизованные нориты и габбро-нориты предгорий Выручуайвенч; 15 – кварцевые габбро и диориты; 16 – андезиты, дациты и их туфы; 17 – метадиабазы и метамандельштейны серии Имандра-Варзуга; 18 – массивные габбро-нориты и габбро Главного хребта (Мончетундровского массива); 19 – те же породы, но метаморфизованные и рассланцованные; 20 – гнейсы кольско-беломорского комплекса; 21 – диориты, гранодиориты; 22 – разрывные нарушения; 23 – контакты массивов; 24 – границы распространения пород; 25 – тектонические зоны (А – зона осевой части Мончетундровского массива; Б – Монче-Кахозерская зона; В – зона Лампрофирового разлома); 26 – четыре рудоперспективные зоны, выделенные по результатам геологоразведочных и геофизических работ в восточной части Мончетундровского массива (Г – зона № 4; Д – зона № 3; Е – зона № 2; Ж – зона № 1); 27 – аномальные области с повышенной электропроводностью, выделенные по результатам работ ММЗ; 28 – контур планшета магнитной съемки, в пределах которого выполнялся вейвлет-анализ массива геофизических данных; 29 – местоположения интенсивных локальных максимумов двумерного вейвлет-преобразования на наименьшем масштабном уровне a ; 30 – буровые скважины, в которых производился заряд при выполнении работ ММЗ.

Наибольший интерес представляют крупные интрузивные массивы перидотит-пироксенит-габброноритового комплекса, такие как Мончетундровский, Мончегорский и другие, поскольку к ним и приурочены основные рудопроявления и месторождения медно-никелевых, хромовых, титаномагнетитовых руд и металлов платиновой группы. Данная область рассматривается как рудно-магматическая система центрального типа, а массивы основных и ультраосновных пород – как ее наиболее крупные рудоносные и потенциально рудоносные элементы [Любчик, 2012].

Тектонические нарушения различного масштаба и направления в исследуемом районе распространены исключительно широко, что обусловлено его приуроченностью к рифтогенной структуре в зоне сочленения Беломорского и Кольского геоблоков. Основную роль в формировании блоковой структуры района играют глубинные разломы северо-западного направления, такие как Сейдозерский, Мончетундровский, Кашкозерский, Кислогубский и другие, являющиеся продолжением главных структурообразующих продольных краевых и осевых разломов Имандра-Варзугской рифтогенной зоны, а также трансформные разломы северо-восточного направления – Монче-Кахозерский, Вайкисозерский и другие. Названные разломы, создавая ослабленные зоны, играют важную роль в размещении крупных магматических масс. Тектонические разломы субмеридионального простирания, такие как Западно- и Восточно-Мончегорский, Лампрофировый, Восточный, оказывают влияние на формирование структуры рудных зон. В геофизических полях зоны тектонических нарушений отображаются областями повышенной электропроводности.

Основные месторождения медно-никелевых руд в районе относятся к Мончегорскому плутону [Медно-никелевые..., 1985], приуроченному к узлу пересечения тектонических разломов северо-западного и северо-восточного направлений. Мончегорский плутон состоит из двух ветвей – субмеридионального массива Ниттис-Кумужья-Травяная (НКТ) и субширотных массивов Сопча и Нюд-Поаз. Горизонты сингенетических медно-никелевых вкрапленных руд имеют пластовую форму и залегают согласно с первичной расслоенностью массива. Месторождения гнездово-вкрапленных руд Мончегорского плутона представлены придонной залежью массива НКТ и рудными пластами массивов Сопча (“пласт 330”) и Нюд (“критический горизонт”). Наиболее богатые эпигенетические жильные руды приурочены к системам крутопадающих трещин

в осевых, надмульдовых зонах массивов НКТ и Сопча, характеризующихся наибольшей прототектонической трещиноватостью. Основные рудные минералы медно-никелевых месторождений Мончегорского плутона – пирротин, халькопирит, пентландит, пирит, магнетит.

К западу от Мончегорского плутона расположен Мончетундровский массив, пространственное размещение которого контролируется региональной зоной глубинных разломов северо-западного простириания. Этот интрузивный массив внедрялся несколько позже Мончегорского плутона, но при этом, вероятно, был задействован тот же магмаподводящий канал, расположенный в узле пересечения глубинных разломов северо-западного и северо-восточного простирианий. В пределах области сочленения Мончетундровского массива с Мончегорским плутоном контактируемые породы разбиты на ряд узких линейных блоков, разделенных бластомилонитами. С Мончетундровским массивом ассоциируется хромитовое, сульфидное медно-никелевое и малосульфидное платинометальное оруденения. В восточной части массива, на участке Лойпишнюн, буровыми работами была вскрыта сложнопостроенная зона развития сульфидоносных пород, в которой наряду с сингенетическим вкрапленным оруденением были обнаружены тела массивных эпигенетических сульфидных руд метаморфогенного типа. Рудные тела этого типа обладают более густой вкрапленностью сульфидов (до 50–60 %), обычно сочетающихся с гнездовым оруденением и развитием рудных прожилков. Мощность рудных тел составляет от нескольких метров до первых десятков метров. В целом, по результатам проведенных геологоразведочных и геофизических работ в восточной части Мончетундровской интрузии выделяются четыре рудоперспективные зоны, характеризующиеся разным соотношением слагающих их пород и присущей им металлогенической специализацией [Любчик, 2012]. На юго-востоке основные породы Мончетундровского массива контактируют с вмещающими метаэффузивными породами горы Арваренч.

Южнее массива Сопча располагается Южносопчинский массив, который в структурном отношении занимает промежуточное положение, залегая между Мончетундровским массивом и массивами Мончегорского плутона. Породы норит-габброноритовой зоны массива, приуроченные к северо-восточному тектонизированному контакту с гиперстеновыми диоритами, содержат вкрапленную сульфидную минерализацию с элементами платиновой группы (ЭПГ), а также субколчеданное пирротинное оруденение с низким содержанием никеля и меди.

Так как в Мончегорском рудном районе одним из основных сульфидных рудных минералов является магнитный пирротин и представлен магнетит, положение рудных зон в пространстве хорошо отображается в магнитном поле.

Результаты геофизических работ в Мончегорском рудном районе

В исследуемом районе геофизические исследования разными методами, такими как гравиразведка, магниторазведка, модификации электроразведки, проводились, начиная с 30-х годов XX века. К настоящему времени наиболее перспективные медно-никелевые месторождения Мончегорского плутона – жильные рудные поля массивов НКТ и Сопча, месторождения богатых вкрапленных руд Нюд-II и Морошковое озеро – уже отработаны. В связи с этим для развития сырьевой базы металлургической промышленности Мурманской области в 1994–2003 гг. в Мончегорском районе были проведены широкомасштабные геофизические исследования.

Исходя из гипотезы о наличии в районе рудно-магматической системы центрального типа, в 1999–2002 гг. в нём на нескольких перекрывающихся планшетах были

выполнены электроразведочные работы методом ММЗ [Любчик, 2012]. Эти исследования проводились в режиме разнополярных импульсов со скважностью $S=1$; частота следования импульсов $f=2.44$ Гц; применялся способ измерения градиентов потенциала U . Длина приемной линии MN составляла 100 м. Съёмка выполнялась преимущественно по сети 500×100 м. Длина питающей линии AB для разных планшетов съёмки была различной и варьировалась в пределах 15–20 км. Вспомогательный электрод “бесконечность” B располагался за пределами планшетов съёмки. Источник заряда электрод A размещался в буровых скважинах в местах подсечения рудных зон. При этом зарядное подсечение, во-первых, должно было обладать наименьшим переходным сопротивлением и, во-вторых, располагаться как можно глубже.

В скважинах заряд производился на разных глубинах: в СКВ. М-9 на глубине 379 м, в СКВ. М-29 – 331 м (в жильном поле массива НКТ), в СКВ. 1710 – 154 м (в рудной зоне на участке Лойпишнюн). По результатам измерений строились карты распределения электрического потенциала U от источников заряда и выделялись области с замедленным спадом потенциала при увеличении расстояния от источника. Как правило, эти области повышенной электропроводности соответствовали зонам тектонических нарушений, контролирующим размещение медно-никелевых месторождений и рудопроявлений Мончегорского рудного района.

Технически для выделения аномальных зон с повышенной электропроводностью поля электрического потенциала U пересчитывались в значения кажущегося сопротивления ρ_k по формуле

$$\rho_k = \frac{4\pi\Delta U}{I} \left/ \left(\frac{1}{AM} + \frac{1}{A^*M} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{A^*N} - \frac{2}{BM} + \frac{2}{BN} \right) \right., \quad (1)$$

где ΔU – разность потенциалов между точками M и N , в которых определены значения электрического потенциала; I – сила тока в питающей линии AB ; AM и AN – расстояния от погруженного на глубину h источника заряда A до точек M и N ; A^*M и A^*N – расстояния от зеркального отображения над земной поверхностью источника заряда A^* ; BM и BN – расстояния от питающего электрода “бесконечность” B до точек M и N . Анализ полученных значений ρ_k позволил установить их логнормальное распределение. На рис. 2 представлены график плотности вероятности экспериментального распределения величин логарифмов кажущегося сопротивления (черные точки) и подобранная методом наименьших квадратов теоретическая кривая нормального распределения случайной величины со значением математического ожидания $\mu=7.157$ и дисперсией $\sigma^2=0.156$ (сплошная линия).

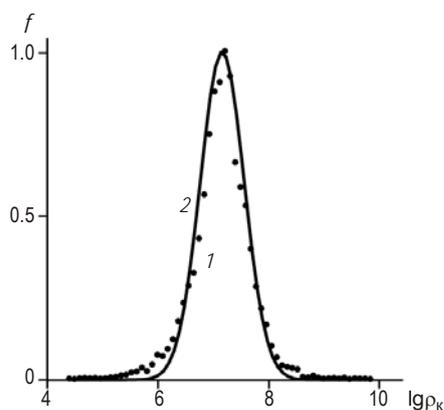


Рис. 2. График плотности вероятности распределения: черные точки – экспериментальные значения $\lg \rho_k$; сплошной график – подобранная теоретическая кривая нормального распределения случайной величины при $\mu=7.157$ и $\sigma^2=0.156$

Fig. 2. The graph of probability density distribution: points indicate the experimental distribution of values of logarithms ρ_k ; solid line is the selected theoretical curve of normal distribution of random variable at $\mu=7.157$ and $\sigma^2=0.156$

Пространственное распределение значений ρ_k в Мончегорском рудном районе определяется преимущественно системой разномасштабных тектонических нарушений Печенгско-Варзугской рифтогенной структуры. Исходя из логнормального характера распределения ρ_k , можно предположить, что распределение количества тектонических нарушений по масштабам описывается степенным соотношением. Такой вывод согласуется с результатами работы [Родкин и др., 2010], в которой исследовались степенные законы распределения величин запасов различных рудных месторождений и отмечалось, что им соответствуют логнормальные распределения значений концентрации рудных компонентов. Для эпигенетических руд метаморфогенного типа, пространственное размещение которых контролируется, как правило, системой тектонических нарушений, запасы месторождений могут зависеть от линейных размеров тектонических нарушений, а концентрация рудных компонент влияет на удельное электрическое сопротивление горных пород. Однако установление взаимосвязи логнормальных распределений ρ_k и концентраций рудных минералов в исследуемом районе требует более детального дополнительного исследования.

Определив среднее квадратичное отклонение σ распределения логарифмов ρ_k , аномальными областями с повышенной электропроводностью стали считать те зоны рудного района, в пределах которых $\lg \rho_k$ отклоняется в меньшую сторону от математического ожидания распределения более чем на величину σ .

Положение выделенных по результатам элктороразведочных работ ММЗ аномальных областей с повышенной электропроводностью показано выше на рис. 1. Наиболее обширная из этих областей приурочена к жильному полю массива НКТ и зоне сочленения Мончегорского плутона с Мончетундровским массивом. Этот район представляет собой тектонический узел, в котором пересекаются Монче-Кахозерская тектоническая зона северо-восточного направления, контролирующая размещение массива НКТ, Мончетундровская зона северо-западного направления, контролирующая размещение массива Мончетундры, и Западно-Мончегорский тектонический разлом субмеридионального простирания. В качестве электропроводящих областей выделяются также жильное поле массива Сопчи и район залегания “пласта 330” в юго-восточной части массива. Локальные зоны пониженного электрического сопротивления наблюдаются на массиве Нюд, в частности, в районах медно-никелевых месторождений Нюд-II и Морошковое озеро. При заряде в СКВ. 1710 в качестве электропроводящей области выделяется участок Лойпишнюн в восточной части Мончетундровского массива, где буровыми скважинами вскрыты тела массивных эпигенетических сульфидных руд. Аномалия пониженного электрического сопротивления наблюдается также в пределах Южносопчинского массива.

Распределение аномальных областей с повышенной электропроводностью носит нерегулярный характер (см. рис. 1) и обусловлено в основном расположением тектонических разломов. Фрактальную размерность d_f множества электропроводящих зон можно оценить клеточным методом [Feder, 1988] из соотношения

$$\ln N(r) = -d_f \ln r + \text{const}, \quad (2)$$

где r – линейный размер клетки; $N(r)$ – количество клеток, необходимое для покрытия множества; const – некоторая константа. На рис. 3 в двойном логарифмическом масштабе приведен график зависимости числа клеток, покрывающих множество областей с повышенной электропроводностью, от линейного размера клеток, меняющегося в диапазоне от 300 до 2000 м. Фрактальная размерность множества d_f , определенная по углу наклона графика, составила 1.38 ± 0.02 .

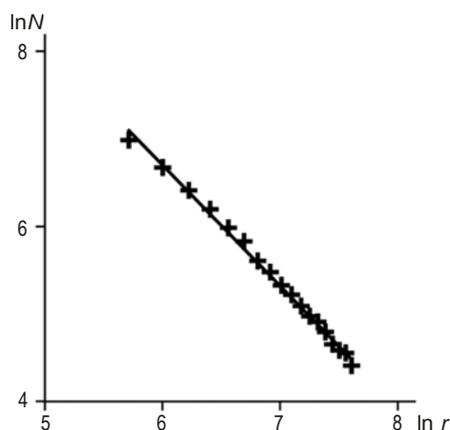


Рис. 3. Зависимость количества необходимых для покрытия множества электропроводящих зон клеток N от их линейного размера r

Fig. 3. The dependence of the number of cells $N(r)$, needed to cover the set of areas with high electrical conductivity, against the linear size r of cells

В 1994–2003 гг. в исследуемом районе были выполнены большие объемы магниторазведки, охватывавшие недостаточно изученные районы южнее Мончегорского плутона, в частности, южную часть Мончетундровского массива, Южносопчинский массив, район Морошкового озера в южной части массива Нюд, комплекс вмещающих метаэффузивных пород горы Арваренч. Вследствие широкого распространения магнитных рудных минералов, таких как пирротин и магнетит, рудные зоны хорошо отображаются в магнитном поле. Так, по данным магниторазведки можно проследить рудоперспективные зоны, линейно простирающиеся вдоль восточного борта Мончетундровского массива. Наиболее интенсивными магнитными аномалиями выделяются рудные зоны № 2 (Е на рис. 1) и № 3 (Д на рис. 1) в районе медно-никелевого рудопроявления на участке Лойпишнюн. Локальные интенсивные магнитные аномалии наблюдаются также в юго-западной части массива Нюд, в зонах выхода на поверхность “критического горизонта” гнездово-вкрапленных медно-никелевых руд, и в районе Морошкового озера. Повышенным магнитным полем характеризуется и Южносопчинский массив. Линейная магнитная аномалия проявляется также на участке горы Арваренч. Сводная карта изолиний напряженности магнитного поля ΔT представлена на рис. 4.

Вейвлет-анализ массивов геофизических данных

В научной литературе отмечалась фрактальная природа систем тектонических разломов [Turcotte, 1992]. Расположение Мончегорского рудного района в центральной части Печенгско-Варзугской рифтогенной структуры определяет широкое распространение на этой территории тектонических нарушений разного масштаба и направления. Главные структурообразующие продольные осевые разломы рифтогенной зоны северо-западного направления и трансформные разломы северо-восточного направления оперяются менее крупными тектоническими зонами, контролирующими размещение крупных интрузивных массивов основных и ультраосновных пород; еще более мелкие тектонические нарушения в пределах этих массивов и в зонах их контактов определяют геометрию рудных зон наиболее богатых эпигенетических медно-никелевых руд. В целом, иерархическая система тектонических нарушений определяет сложную блоковую структуру Мончегорского рудного района. Наличие магнитных рудных минералов позволяет проследить в магнитном поле геометрию рудных зон, контролируемую иерархической системой тектонических нарушений. Вследствие этого массивы данных магниторазведки обладают фрактальными свойствами, определяемыми фрактальными свойствами геологических рудных систем. Удобным инструментом для анализа фрактальных свойств массивов геофизических данных является вейвлет-анализ [Wavelets ..., 2013].

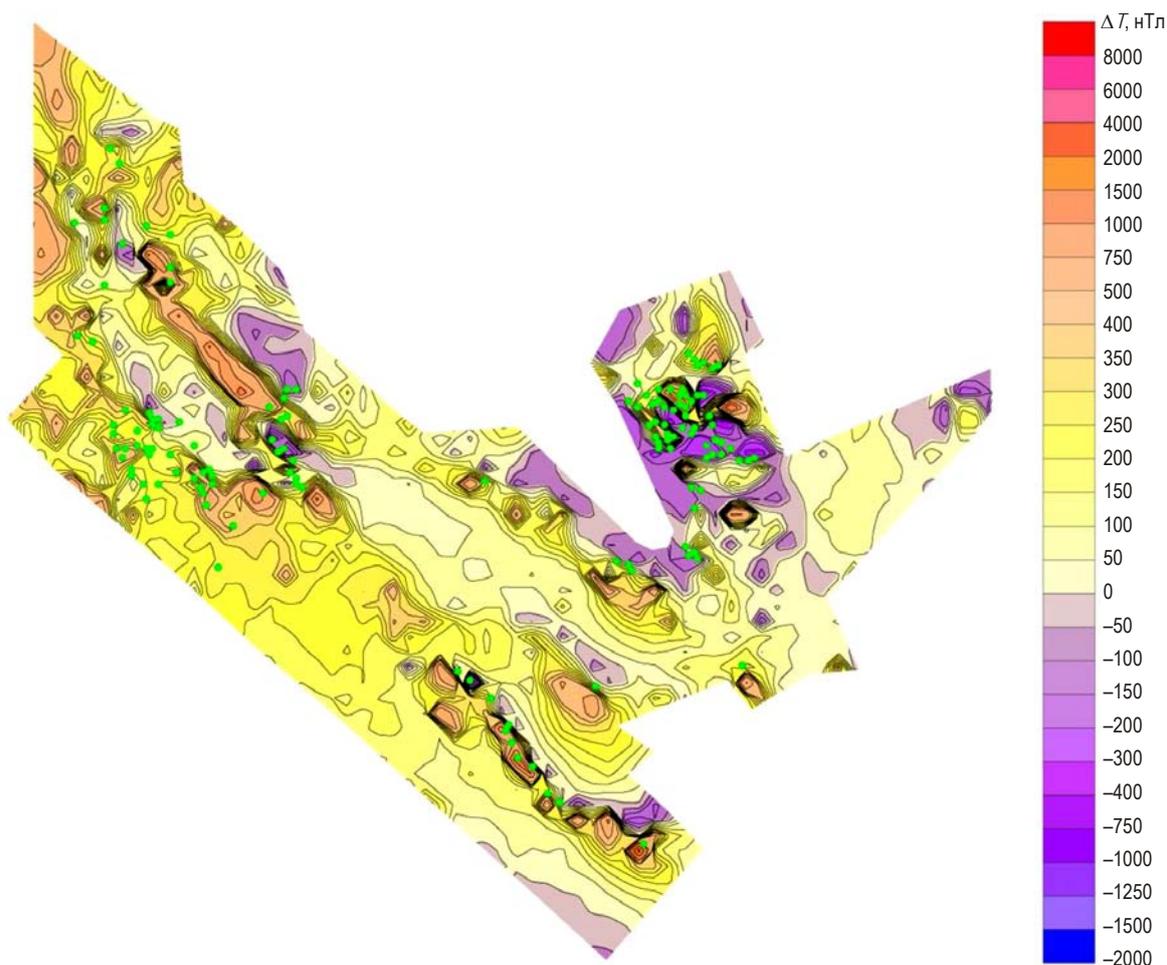


Рис. 4. Карта изолиний напряженности магнитного поля ΔT в южной части Мончегорского рудного района. Зелеными точками отмечено местоположение интенсивных локальных максимумов двумерного вейвлет-преобразования на наименьшем масштабном уровне

Fig. 4. The contour map of the magnetic field ΔT in the southern part of the Monchegorsk ore region. Green circles on the map indicate the location of intense local maxima of the two-dimensional wavelet transform at the smallest scale level

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

$$f(t) = \sum_{j,k=-\infty}^{+\infty} c_{jk} \psi_{jk}(t), \quad (3)$$

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

$$\psi_{jk}(t) = 2^{j/2} \psi(2^j t - k). \quad (4)$$

Интегральное вейвлет-преобразование одномерного сигнала можно записать как

$$Wf(b, a) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt, \quad (b, a) \in R, \quad (5)$$

где ψ^* – комплексно сопряженная функция; b – параметр сдвига анализирующего вейвлета вдоль координатной оси; a – масштабный параметр растяжения вейвлета, который играет такую же роль, как период T в преобразовании Фурье. В таком случае коэффициенты c_{jk} разложения (3) можно определить как

$$c_{jk} = Wf \left(\frac{k}{2^j}, \frac{1}{2^j} \right). \quad (6)$$

Вейвлет-разложение обеспечивает своеобразную двумерную развертку исследуемого сигнала в физическом (вдоль координаты) и частотном пространствах; при этом частота и координата рассматриваются как независимые переменные. Базисные функции вейвлет-преобразования локализованы не только в физическом 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 в физическом 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 поведении сигнала вдоль координаты на данных частотах.

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 – скелетон вейвлет-преобразования – также будет иметь иерархическое строение. Скелетон состоит из хребтов – цепочек локальных максимумов, характеризующих, как локальная неоднородность сигнала в определенной точке $t=b$ координатной оси отображается на различных масштабных уровнях a вейвлет-преобразования.

Свойства автомодельности базиса и частотно-пространственной локализации вейвлет-преобразования позволяют исследовать локальные неоднородности сигнала. Если анализируемый ряд имеет в некоторой точке сингулярность

$$|f(t+t_0) - f(t)| = c|t_0|^{\alpha_l} \quad (7)$$

с локальным показателем $\alpha_l < 1$, то коэффициенты вейвлет-преобразования ряда в окрестности этой точки должны подчиняться соотношению [Астафьева, 1996]

$$Wf(t_0, a) \approx ca^{\alpha_l - d/2 + 1} \quad \text{при } a \rightarrow 0, \quad (8)$$

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_l для рассматриваемой неоднородности массива данных.

В двумерном случае коэффициенты вейвлет-преобразования зависят от четырех параметров – двух параметров сдвига и двух масштабных параметров. Как отмечалось выше, Печенгско-Варзугская рифтогенная структура характеризуется наличием широкой сети тектонических нарушений различных направлений, контролирующей размещение интрузивных массивов основных и ультраосновных пород и определяющих рас-

положение рудных зон, а, следовательно, и характер распределения магнитного поля в исследуемом рудном районе. Вследствие такой разнонаправленности тектонических разломов можно говорить о равнозначности различных направлений координатных осей при проведении вейвлет-анализа массива данных магнитной съемки. Поэтому в данной работе для удобства рассмотрения анализировались только те коэффициенты, у которых масштабные параметры по разным осям совпадали.

По сравнению с традиционными методами анализа массивов геофизических данных, например, таких как дисперсионный анализ, вейвлет-анализ позволяет получить дополнительную информацию о неоднородной структуре потенциальных геофизических полей, отражающих структуру исследуемой геологической системы. Как отмечалось выше, благодаря свойству автомодельности базисных функций, вейвлет-анализ удобно использовать для выявления иерархической структуры организации геологических систем, в частности, рудных зон. Наличие фрактальных свойств подразумевает крайнюю неоднородность массива геофизических данных. Поэтому участки с резкими изменениями магнитного поля, перспективные на обнаружение рудных тел, выделяются не только пониженными значениями локального показателя сингулярности α_i , но и повышенной дисперсией магнитного поля, в связи с чем могут быть откартированы с помощью дисперсионного анализа. Однако высокая дисперсия распределения значений геофизических потенциальных полей не подразумевает автоматически наличия фрактальных свойств. Установление иерархической структуры распределения неоднородностей в массиве геофизических данных позволяет более адекватно отобразить структуру рудных зон на исследуемых участках даже в том случае, когда магнитные аномалии, связанные с рудными зонами, не сильно выделяются по амплитуде и дисперсии магнитного поля.

Результаты вейвлет-анализа двумерного массива данных магниторазведки

Магниторазведочные работы в южной части Мончегорского рудного района проводились по отдельным участкам с разной степенью детальности и с разной ориентацией профилей, расположенных преимущественно вкрест простирания горных пород Мончетундровского массива. Район проведения магниторазведочных работ в целом простирался в широтном направлении на 13 км, в меридиональном – на 9 км. Для формирования двумерного прямоугольного массива данных, необходимого для проведения вейвлет-анализа, площадь района была разбита на квадратные ячейки с шагом 20 м. Каждой ячейке приписывалось то значение магнитного поля, которое было измерено в точке наблюдения, оказавшейся в пределах ячейки. Если в пределах данной ячейки располагалось несколько точек измерения магнитного поля, то выбиралось максимальное по амплитуде значение. Ячейкам на краях планшета, где измерения магнитного поля не производились, приписывалось нулевое значение. Таким образом был сформирован прямоугольный массив данных размером 1013 на 856 значений.

Так как общий контур планшета магнитной съемки в южной части исследуемого района имеет сложную, изломанную форму (см. рис. 1), то количество ячеек с нулевыми значениями составляет значительную (порядка 50 %) долю от общего их числа. Выбор нулевых значений в качестве фоновых представляется оправданным для массива знакопеременных данных напряженности магнитного поля ΔT . Возникшие при этом на границе планшета съемки локальные максимумы вейвлет-преобразования при дальнейшем анализе не рассматривались. Наличие большого количества нулевых ячеек, безусловно, приводит к искажению оценок значений локальных максимумов на больших масштабных уровнях a , поэтому вейвлет-анализ проводился лишь на ограниченном

числе относительно небольших масштабных уровней. Кроме того, дополнительная отбраковка локальных максимумов проходила при анализе зависимости коэффициентов вейвлет-преобразования от масштабного параметра a вдоль отдельных хребтов скелетона. В случаях значительных искажений данных кривых, отражающихся в увеличении погрешности при определении значений локального показателя сингулярности α_l , соответствующие локальные максимумы вейвлет-преобразования из дальнейшего анализа также исключались.

Для вейвлет-анализа массива данных магнитной съемки использовался вейвлет $\text{sym}4$, называемый симлетом [Смоленцев, 2005]. Симлеты, во-первых, обладают компактным носителем – диапазоном координат, за пределами которого функция $\psi(t)$ быстро затухает, что полезно при анализе ограниченных массивов данных. Во-вторых, симлеты имеют относительно симметричную форму, которая соответствует типичной магнитной аномалии. Линейные размеры массива геофизических данных позволили провести анализ коэффициентов вейвлет-разложения на семи пространственных масштабах $a=2^j, j=1-7$. Так как общее количество локальных максимумов вейвлет-преобразования, обусловленных в основном незначительными вариациями магнитного поля, очень велико, а их распределение в пределах планшета геофизических данных достаточно равномерно, то целесообразно рассматривать только интенсивные локальные максимумы, амплитуда которых превышает определенный порог. Пороговое значение выбирается таким, чтобы подавлялись локальные максимумы, вызванные малыми изменениями магнитного поля.

Проанализируем распределение по площади планшета магнитной съемки интенсивных локальных максимумов вейвлет-преобразования на самом меньшем масштабе, обратившись к рис. 1, 4. Как можно видеть на рис. 1, значительная группа интенсивных локальных максимумов вейвлет-преобразования расположена в восточной части Мончетундровского массива в пределах рудоперспективных зон № 3, 4 (зоны Д, Г на рис. 1). Район расположения локальных максимумов частично совпадает с аномальной областью повышенной электропроводности на участке Лойпишнюн, выявленной по результатам геофизических работ методом мелкомасштабного заряда в СКВ. 1710. Буровыми работами здесь была вскрыта зона развития эпигенетических медно-никелевых руд метаморфогенного типа, характеризующаяся гнездово-вкрапленным оруденением и развитием рудных прожилков. Рудоперспективная зона № 3 прослеживается в магнитном поле и далее к северо-западу от участка Лойпишнюн, где буровыми скважинами в основном подсекались зоны редко- и средневкрапленной сульфидной и хромитовой минерализации. Среднее значение локального показателя сингулярности α_l для данной группы максимумов вейвлет-преобразования составляет 0.94 ± 0.19 , что характерно для вкрапленной минерализации в рудных месторождениях Мурманской области. Подобные значения локального показателя сингулярности, соответствующие месторождениям вкрапленных медно-никелевых руд, отмечались также при вейвлет-анализе двумерного массива данных магнитной съемки Печенгского рудного района, расположенного в северо-западной части Печенгско-Варзугской рифтогенной структуры [Любчик, 2017].

Восточнее расположена еще одна группа интенсивных локальных максимумов вейвлет-преобразования, которая пространственно соответствует зоне контакта Мончегорского плутона с Мончетундровским интрузивом и расположена в пределах рудоперспективных зон № 2, 1 (Ж, Е на рис. 1). Буровые скважины, пройденные в этом районе, также вскрыли зоны вкрапленной сульфидной и хромитовой минерализации. Среднее значение локального показателя сингулярности α_l для этой группы максимумов вейвлет-преобразования близко к единице – 0.95 ± 0.12 .

Особый интерес представляет северная группа локальных максимумов вейвлет-преобразования, также расположенная в области сочленения Мончегорского плутона с Мончетундровским массивом, но приуроченная к Монче-Кахозерской тектонической зоне северо-восточного направления. Данная зона ассоциируется с одним из основных каналов рудно-магматической системы, контролирующим размещение субмеридиональной ветви Мончегорского плутона – массива НКТ, который определяет геометрию жильного поля массивных медно-никелевых руд. По результатам измерений ММЗ зона характеризуется пониженным электрическим сопротивлением, в связи с чем она считается потенциально перспективной на обнаружение богатого сульфидного медно-никелевого оруденения эпигенетического типа. Среднее значение локального показателя сингулярности α_l для этой группы максимумов вейвлет-преобразования также указывает на значительную неоднородность магнитного поля и составляет 0.79 ± 0.12 .

Очень интенсивные магнитные аномалии наблюдаются в юго-западной части массива Нюд. По данным ММЗ, в восточной части Мончегорского рудного района выделяются локальные зоны с повышенной электропроводностью, расположенные в пределах массива Нюд и вблизи Морошкового озера. Интенсивные локальные максимумы вейвлет-преобразования концентрируются в основном в местах выхода на поверхность “критического горизонта”, характеризующегося гнездово-вкрапленным сульфидным медно-никелевым оруденением, причем одним из главных рудных минералов является магнитный пирротин (до 90 %) [Медно-никелевые . . ., 1985]. Структурно участок приурочен к системе Лампрофирового тектонического разлома субмеридионального простирания; в этом районе располагались уже отработанные месторождения медно-никелевых руд Нюд-II и Морошковое озеро. Резкая неоднородность магнитного поля отражается и на пониженных значениях локального показателя сингулярности α_l для соответствующей группы максимумов вейвлет-преобразования – среднее значение показателя 0.72 ± 0.13 .

Отдельные максимумы вейвлет-преобразования наблюдаются и в пределах Южносопчинского массива. Соответствующие им значения локального показателя сингулярности близки к единице, что свидетельствует об относительной однородности магнитного поля. Геологоразведочные работы, проводившиеся в этом районе, установили, что породы массива содержат вкрапленную сульфидную минерализацию с элементами платиновой группы; это так называемый малосульфидный тип платинометалльного оруденения, который слабо отражается в магнитном поле.

Среди магнитных аномалий южной части Мончегорского рудного района следует отметить узкую линейную аномалию, расположенную к юго-востоку от Мончетундровского массива в зоне вмещающих метаэффузивных пород горы Арваренч. Пробуренные здесь скважины вскрыли маломощный массив магнетитсодержащих основных–ультраосновных пород, который структурно контролируется той же системой тектонических нарушений северо-западного направления, что и рудоперспективные зоны Мончетундровского интрузива. Среднее значение локального показателя сингулярности α_l для интенсивных максимумов вейвлет-преобразования, отмеченных в этой зоне, близко к единице и составляет 0.95 ± 0.13 . В качестве погрешностей указано среднеквадратическое отклонение по группам значений локальных показателей сингулярности, расположенных в пределах отдельных участков.

Примеры графиков зависимости амплитуды максимумов вейвлет-преобразования от значения масштабного параметра a для трех разных участков исследуемого района приведены в двойном логарифмическом масштабе на рис. 5.

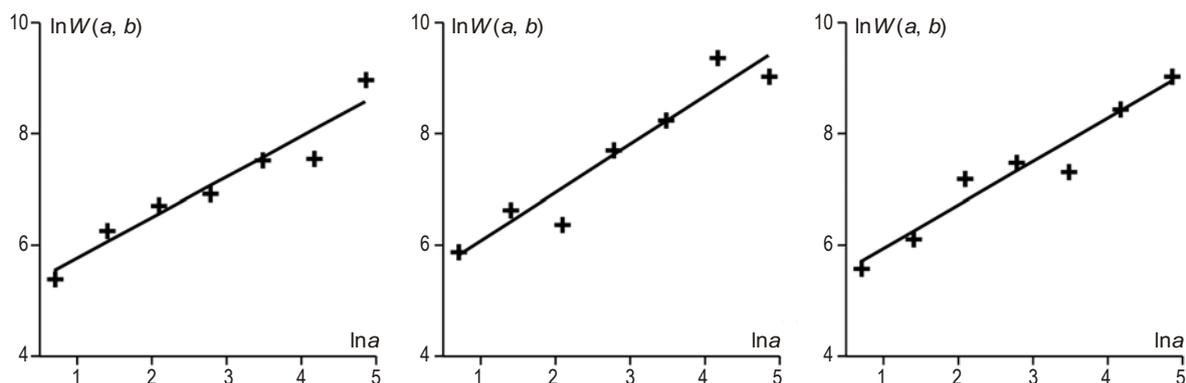


Рис. 5. Графики зависимости амплитуды максимумов вейвлет-преобразования от значения масштабного параметра a вдоль отдельных хребтов скелетона вейвлет-преобразования для зоны Монче-Кахозерского тектонического разлома, контролирующей расположение массива НКТ (слева, $\alpha_l=0.73\pm 0.09$), участка Лойпишнюн в восточной части Мончетундровского массива (по центру, $\alpha_l=0.87\pm 0.12$) и юго-западной части массива Нюд в районе выхода на поверхность “критического горизонта” с гнездово-вкрапленным медно-никелевым оруденением (справа, $\alpha_l=0.78\pm 0.09$)

Fig. 5. Plots of amplitudes of wavelet transform maxima depending on the scale parameter a along separate ridges of the skeleton of the wavelet transform for different areas of the ore region: *left plot* – the zone of the Monche-Kahozerskiy tectonic fault, controlling the placement of the NKT massif ($\alpha_l=0.73\pm 0.09$); *central plot* – the area of the Loypishnjun site in the eastern part of the Monchetundra massif ($\alpha_l=0.87\pm 0.12$); *right plot* – the area of the outcrop of the “critical horizon” of nest-disseminated copper-nickel ores in the South-Western part of the massif Njud ($\alpha_l=0.78\pm 0.09$)

Можно видеть, что локальные показатели сингулярности α_l , определяемые по углам наклона графиков в двойном логарифмическом масштабе, имеют разные значения. Самое низкое значение $\alpha_l=0.73\pm 0.09$ характерно для максимума вейвлет-преобразования в зоне Монче-Кахозерского тектонического разлома, контролирующей жильное поле НКТ и являющейся наиболее перспективной на обнаружение богатых медно-никелевых руд эпигенетического типа. Относительно низкое значение $\alpha_l=0.78\pm 0.09$ отмечается также для максимума вейвлет-преобразования в юго-западной части массива Нюд в районе выхода на поверхность “критического горизонта” гнездово-вкрапленных медно-никелевых руд. Для максимума вейвлет-преобразования в пределах участка Лойпишнюн Мончетундровского интрузивного массива, где буровыми скважинами были вскрыты зоны вкрапленного сульфидного оруденения, $\alpha_l=0.87\pm 0.12$. Погрешности рассчитаны методом наименьших квадратов при линейной интерполяции графиков в двойном логарифмическом масштабе.

Таким образом, можно утверждать, что имеет место определенная взаимосвязь между значениями локального показателя сингулярности α_l и рудоперспективностью отдельных участков в Мончегорском рудном районе. Месторождения с наличием богатых сплошных и брекчиевидных руд характеризуются, как правило, сильно неоднородным магнитным полем, что и демонстрируется пониженными значениями показателя сингулярности. Для рудопроявлений и месторождений вкрапленных руд магнитное поле имеет более спокойный характер, значения показателя сингулярности близки к единице.

С учетом изложенного дальнейшее развитие методики, основанной на двумерном вейвлет-анализе массивов данных магнитной съемки, представляется целесообразным, как и ее опробование на других рудных месторождениях, магнитное поле в пределах которых определяется концентрацией магнитных рудных минералов.

Выводы

Иерархическая система тектонических разноориентированных нарушений различного масштаба в Мончегорском рудном районе контролирует размещение крупных интрузивных массивов основных и ультраосновных пород и расположение месторождений и рудопроявлений богатых эпигенетических медно-никелевых руд, формируя благодаря этому единую рудно-магматическую систему центрального типа.

Иерархическая структура геологической системы определяет фрактальные свойства массивов геофизических данных, получаемых при проведении площадных съемок в пределах рудного района. Так, зоны тектонических разломов обуславливают распределение областей с повышенной электропроводностью, клеточная фрактальная размерность множества которых составила $d_f = 1.38 \pm 0.02$.

Удобный инструмент для изучения фрактальных свойств массивов геофизических данных – двумерный вейвлет-анализ, позволяющий выявлять иерархическую структуру организации геологической системы в целом и производить количественные оценки степени неоднородности геофизических полей по отдельным участкам. Количественной характеристикой неоднородности среды в данной точке пространства может служить локальный показатель сингулярности α_l , рассчитываемый для отдельных хребтов скелетона вейвлет-преобразования.

Для участков, перспективных на обнаружение богатых эпигенетических медно-никелевых руд и характеризующихся крайне неоднородным магнитным полем, локальный показатель сингулярности имеет пониженные значения. Примерами таких участков могут служить зона Монче-Кахозерского тектонического разлома, контролирующего жильное поле НКТ, и юго-западная часть массива Нюд, в пределах которой находятся месторождения медно-никелевых руд Нюд-II и Морошковое озеро.

Для характеризующихся более спокойным магнитным полем участков с преимущественно вкрапленным оруденением, например таких, как рудоперспективные зоны Мончетундровского интрузивного массива, локальный показатель сингулярности близок к единице.

Таким образом, можно утверждать, что в Мончегорском рудном регионе существует взаимосвязь между значениями локального показателя сингулярности α_l и рудоперспективностью отдельных участков. Дальнейшее развитие методики, основанной на двумерном вейвлет-анализе массивов геофизических данных, позволит более эффективно определять иерархическую структуру рудных месторождений и делать выводы о локальных свойствах геологической системы, а именно, о рудоперспективности отдельных участков.

Литература

Астафьева Н.М. Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения // Успехи физических наук. 1996. Т. 166 (11). С.1145–1170.

- Горяинов П.М., Иванюк Г.Ю. Самоорганизация минеральных систем. Синергетические принципы геологических исследований. М.: ГЕОС, 2001. 312 с.
- Любчик В.А. Изучение фрактальных свойств геологических сред методами геоэлектрики. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co, 2012. ISBN: 978-3-8465-9959-4. 117 с.
- Любчик В.А. Исследование фрактальных свойств массива данных магнитной съемки Печенгского рудного района с использованием двумерного вейвлет-анализа // Геология и геофизика. 2017. Т. 58, № 9. С.1422–1432.
- Медно-никелевые месторождения Балтийского щита / Под ред. Г.И. Горбунова, Х. Папунен. Л.: Наука, 1985. 329 с.
- Родкин М.В., Зотов И.А., Граева Е.М., Лабунцова Л.М., Шатахиян А.Р. Степенные распределения в рудо- и нефтегенезе – интерпретация и порождающие механизмы // Российский журнал наук о Земле. 2010. Т. 11. RE3005. doi: 10.2205/2009ES000408
- Смоленцев Н.К. Основы теории вейвлетов. Вейвлеты в MATLAB. М.: ДМК Пресс, 2005. 304 с.
- Bansal A.R., Dimri V.P. Gravity evidence for mid crustal structure below Delhi fold belt and Bhilwara super group of western India // Geophysical Research Letters. 1999. V. 26. P.2793–2795.
- Bansal A.R., Dimri V.P. Depth determination from nonstationary magnetic profile for multi scaling geology // Geophysical Prospecting. 2005. V. 53. P.399–410.
- Chamoli A., Dimri V.P. Evidence of continental crust over Laxmi Basin (Arabian Sea) using wavelet analysis // Indian Journal of Marine Sciences. 2007. V. 36, N 2. P.117–121.
- Chamoli A., Srivastava R.P., Dimri V.P. Source depth characterization of potential field data of Bay of Bengal by continuous wavelet transform // Indian Journal of Marine Sciences. 2006. V. 35, N 3. P.195–204.
- Chamoli A., Pandey A.K., Dimri V.P., Banerjee P. Crustal configuration of the northwest Himalaya based on modeling of gravity data // Pure and Applied Geophysics. 2011. V. 168. Is. 5. P.827–844.
- Feder J. Fractals. New York: Plenum Press, 1988. 312 p.
- Fedi M., Quarta T., Sanits A.D. Inherent power-law behavior of magnetic field power spectra from a Spector and Grant ensemble // Geophysics. 1997. V. 62. P.1143–1150.
- Fractal Behaviour of the Earth System / Ed. V.P. Dimri. New York: Springer, 2005. 207 p.
- 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 Geology Review. 2010. V. 38. Is. 4. P.307–318.
- Mandelbrot B.B. The fractal geometry of nature. San Francisco: W.H. Freeman & Co, 1982. 460 p.
- Maus S., Dimri V.P. Scaling properties of potential fields due to scaling sources // Geophys. Res. Lett. 1994. V. 21. P.891–894.
- Maus S., Dimri V.P. Potential field power spectrum inversion for scaling geology // J. Geophys. Res. 1995. V. 100. P.12605–12616.
- McCaffrey K.J.W., Johnston J.D. Fractal analysis of a mineralized vein deposit: Curraghinalt gold deposit, County Tyrone // Mineralium Deposita. 1996. V. 31. P.52–58.
- Pilkington M., Todoeschuck J.P. Fractal magnetization of continental crust // Geophys. Res. Lett. 1993. V. 20. P.627–630.
- Raines G.L. Are fractal dimensions of the spatial distribution of mineral deposits meaningful? // Natural Resources Research. 2008. V. 17. Is. 2. P.87–97.
- Turcotte D.L. Fractals and Chaos in Geology and Geophysics. New York: Cambridge University Press, 1992. 221 p.
- 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.

Сведения об авторе

ЛЮБЧИЧ Владимир Алексеевич – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, Полярный геофизический институт. 183010, Мурманск, ул. Халтурина, д. 15. Тел. +7(921) 278-10-56. E-mail: lubchich@yandex.ru

FRACTAL PROPERTIES OF GEOPHYSICAL DATA ARRAYS USING THE TWO-DIMENSIONAL WAVELET ANALYSIS: MAGNETIC AND GEOELECTRICAL SURVEY IN THE MONCHEGORSK ORE REGION

V.A. Lubchich

Polar Geophysical Institute, Murmansk, Russia

Abstract. The article deals with the investigation of fractal properties of geophysical data arrays, obtained in the Monchegorsk ore region as a result of areal magnetic surveys and geoelectrical surveys by the method of small-scale charge. The ore region is located in the Central part of the Pechenga-Varzugskaya riftogenic structure. This circumstance causes the presence of the hierarchically organized system of tectonic dislocations of various scales and directions in the region. Main structural longitudinal axial faults of the North-West direction and transform faults of the North-East direction together with concomitant tectonic zones of smaller scales control the placement of intrusive massifs of basic-ultrabasic rocks and define the structure of deposits and occurrences of rich epigenetic copper-nickel ores, thus forming the Monchegorsk ore-magmatic system of the Central type. The hierarchical organization of geological systems determines fractal properties of geophysical data arrays, obtained in the result of areal measurements on these systems. So the network of tectonic faults is displayed in geophysical fields as the set of anomalous zones with the high electrical conductivity. The fractal dimension of this set, estimated by the cell method, is $d_f = 1.38 \pm 0.02$. Moreover ore zones are clearly displayed in the magnetic field due to the wide spread of magnetic ore minerals such as pyrrhotite and magnetite. It was shown on the example of magnetic survey data in the Monchegorsk ore region, that the two-dimensional wavelet analysis is useful tool to study fractal properties of geophysical data arrays. The application of the wavelet analysis allows to detect the hierarchical structure of organization of the whole geological system and to conclude about its local properties, for example, ore prospects of separate areas. The average value of local singularity exponents α_l , calculated for separate ridges of the skeleton of the wavelet transform, may be used as the quantitative characteristic of the magnetic field inhomogeneity within the investigated area. Zones, promising discovery of rich epigenetic copper-nickel ores, are characterized by the strongly inhomogeneous magnetic field, and corresponding local singularity exponents have smaller values. Areas with the predominantly low and medium level of disseminated mineralization are characterized by the more homogeneous magnetic field, and corresponding local singularity exponents are close to unity.

Keywords: copper-nickel ore, tectonic fault, magnetic field, the method of small-scale charge, fractal dimension, wavelet transform, local singularity exponent.

References

- Astafjeva N.M., Wavelet analysis: principles of theory and application examples. *Physics-Uspekhi (Advances in Physical Sciences)*, 1996, vol. 166 (11), pp. 1145-1170.
- Bansal A.R. and Dimri V.P., Depth determination from nonstationary magnetic profile for multi scaling geology, *Geophysical Prospecting*, 2005, vol. 53, pp. 399-410.
- Bansal A.R. and Dimri V.P., Gravity evidence for mid crustal structure below Delhi fold belt and Bhilwara super group of western India, *Geophys. Res. Lett.*, 1999, vol. 26, pp. 2793-2795.
- Chamoli A. and Dimri V.P., Evidence of continental crust over Laxmi Basin (Arabian Sea) using wavelet analysis, *Indian Journal of Marine Sciences*, 2007, vol. 36, no. 2, pp. 117-121.
- Chamoli A., Pandey A.K., Dimri V.P., and Banerjee P., Crustal configuration of the northwest Himalaya based on modeling of gravity data, *Pure and Applied Geophysics*, 2011, vol. 168, is. 5, pp. 827-844.
- Chamoli A., Srivastava R.P., and Dimri V.P., Source depth characterization of potential field data of Bay of Bengal by continuous wavelet transform, *Indian Journal of Marine Sciences*, 2006, vol. 35, no. 3, pp. 195-204.
- Feder J., *Fractals*, New York: Plenum Press, 1988.
- Fedi M., Quarta T., and Sanits A.D., Inherent power-law behavior of magnetic field power spectra from a Spector and Grant ensemble, *Geophysics*, 1997, vol. 62, pp. 1143-1150.
- Fractal Behaviour of the Earth System, Editor V.P. Dimri, New York: Springer, 2005.

- Gorjainov P.M. and Ivanjuk G.Ju., *Samoorganizaciya mineralnyh sistem. Sinergeticheskie principy geologicheskikh issledovaniy* (Self-organization of mineral systems. Synergetic principles of geological research), Moscow: Geos, 2001.
- Gumiel P., Sanderson D.J., Arias M., Roberts S., and Martin-Izard A., Analysis of the fractal clustering of ore deposits in the Spanish Iberian Pyrite Belt, *Ore Geology Review*, 2010, vol. 38, is. 4, pp. 307-318.
- Lubchich V.A., *Izuchenie fraktalnyh svoystv geologicheskikh sred metodami geoelektriki*. (The investigation of fractal properties of geological media by using methods of geoelectrics), Saarbrucken: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co, 2012. ISBN: 978-3-8465-9959-4.
- Lubchich V.A., Investigation of fractal properties of the magnetic survey data array in the Pechenga ore region using two-dimensional wavelet analysis. *Russian Geology and Geophysics*, 2017, vol. 58, Is. 9, pp. 1129-1137.
- Mandelbrot B.B., *The fractal geometry of nature*, San Francisco: W.H. Freeman & Co, 1982.
- Maus S. and Dimri V.P., Potential field power spectrum inversion for scaling geology, *J. Geophys. Res.*, 1995, vol. 100, pp. 12605-12616.
- Maus S. and Dimri V.P., Scaling properties of potential fields due to scaling sources, *Geophys. Res. Lett.*, 1994, vol. 21, pp. 891-894.
- McCaffrey K.J.W. and Johnston J.D., Fractal analysis of a mineralized vein deposit: Curraghinalt gold deposit, County Tyrone, *Mineralium Deposita*, 1996, vol. 31, pp. 52-58.
- Medno-nikelevye mestorozhdeniya Baltijskogo shchita* (Copper-Nickel deposits of the Baltic shield), Editors G.I. Gorbunov and H. Papunen, Leningrad: Nauka, 1985.
- Pilkington M. and Todoeschuck J.P., Fractal magnetization of continental crust, *Geophysical Research Letters*, 1993, vol. 20, pp. 627-630.
- Raines G.L., Are fractal dimensions of the spatial distribution of mineral deposits meaningful?, *Natural Resources Research*, 2008, vol. 17, is. 2, pp. 87-97.
- Rodkin M.V., Zotov I.A., Grayeva E.M., Labuntsova L.M., Shatakhtsyan A.R., Power distributions in ore and oil genesis – interpretation and generating mechanisms. *Russian journal of Earth sciences*, 2010, vol. 11, RE3005, doi: 10.2205/2009ES000408
- Smolencev N.K., *Osnovy teorii vejvletov. Vejvlety v MATLAB* (Principles of the theory of wavelets. Wavelets in MATLAB), Moscow: DMK Press, 2005.
- Turcotte D.L., *Fractals and Chaos in Geology and Geophysics*, New York: Cambridge University Press, 1992.
- Wavelets and Fractals in Earth System Sciences*, Editors E. Chandrasekhar, V.P. Dimri and V.M. Gadre, Boca Raton, London, New York: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2013.