

УДК [550.8:553.3/9]:51

С.С. ШАКИН, И.Г. САВИНА

ФРАКТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЗАПАСОВ ОЛОВА НА ДЕПУТАТСКОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ (УРОВНИ ШТУФ-РУДНОЕ ТЕЛО)

Статистическим фрактальным анализом образцов, отобранных из крупнейших рудных тел месторождения, выявлены соответствие пространственных статистик распределения в штуфах олова модели точечного самоподобного фрактала и закономерное изменение фрактальной размерности запасов с глубиной. Рассчитанные величины фрактальной размерности штуфов сопоставимы с фрактальными размерностями рудных тел по запасам отработанных выемочных блоков. Изучена дискретность запасов олова на масштабном уровне образцов и рассчитаны величины естественных порций (квантов) запасов, что создает основу для оценки прогнозных ресурсов рудного тела по кванту умножением на средний коэффициент перехода.

Фрактальный анализ — новая область науки, возникшая после публикации фундаментальных трудов Б. Мандельброта, который показал, что геометрия большинства природных объектов допускает, кроме характеристики традиционными геометрическими понятиями (плоскость, линия, геометрическая фигура), описание фракталами (объектами с дробной топологической размерностью) [3]. Суть фрактального анализа заключается в исследовании динамики изменений геометрии (в том числе статистической) изучаемого объекта при изменении масштаба рассмотрения.

В последние годы предприняты попытки использовать принципы и методы фрактального анализа при решении геологических задач. Применительно к геологии самоподобным фракталом называется объект, строение которого при рассмотрении на различных масштабных уровнях обнаруживает принципиальное подобие, при этом число фиксируемых элементов строения при переходе от одного масштабного уровня к другому изменяется в степенной пропорции. Таким образом, если в логарифмическом масштабе построить график зависимос-

ти числа элементов объекта от масштаба рассмотрения, то полученные значения должны аппроксимироваться прямой линией. Скорость нарастания числа элементов при увеличении масштаба рассмотрения называется фрактальной размерностью D , она определяется как тангенс угла наклона этой прямой к оси абсцисс.

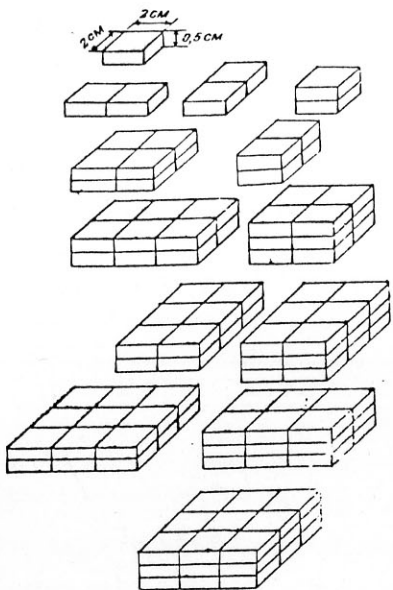
Материалом для наших исследований послужили 13 ориентированных штуфов размером примерно $20 \times 20 \times 20$ см, отобранных на Западном участке Депутатского оловорудного месторождения (северо-восточная Якутия) с таким расчетом, чтобы охарактеризовать все отработываемые в настоящее время горизонты (с абсолютными отметками 761, 711, 661 и 607 м), основные типы руд и находящиеся в контуре обработки вмещающие породы, а также большую часть рудных тел-лидеров (семь из восьми известных). Для фрактального анализа образцы были распилены на миниблоки размером $2 \times 2 \times 1$ см по определенной схеме с обязательной маркировкой. Верхние и нижние грани миниблоков исследованы количественным рентгенорадиометрическим анализом на олово. Всего подготовлено около 500 миниблоков и выполнено около 1000 анализов (руководитель работы Ю.О. Козында). Глубинность метода — 3 мм. Содержание олова определялись сравнением результатов измерений миниблоков с результатами измерений гомогенных стандартных образцов с содержанием олова 2 %, т.е. полученные данные являются эквивалентными содержаниями относительно гомогенной среды. Относительная погрешность — 2,4 %, а порог чувствительности — 0,002 % олова.

По полученным данным, чтобы выяснить, является ли изучаемый объект самоподобным фракталом, проведен статистический фрактальный анализ, включавший два этапа: 1) оценка постоянства значений фрактальной размерности при переходе от одного масштаба рассмотрения к другому; 2) при положительном ответе выяснение степени упорядоченности фрактальной модели изучаемого объекта на различных масштабных уровнях. Под упорядоченностью будем понимать степень одномерности и симметричности распределения содержаний олова в различных равных частях исследуемого образца. Последняя определялась по общепринятому параметру асимметрии распределения, рассчитываемого по гистограмме.

В нашем случае изучаемый объект — множество расположенных в пространстве распиленного образца точек «минимального» запаса (модель точечного фрактала [1]). Модель точечного фрактала представляет исследуемый объект как совокупность точек некоторого «единичного» веса. Эти точки образуют «сгустки» и «разряжения», причем последняя способность периодически изменяется от масштаба к масштабу, выделяя масштабные уровни с относительно однородным и относительно неоднородным распределениями точек.

«Квантом» запасов некоторого ранга названа величина запасов в ячейке осреднения, определенная для некоторого масштабного уровня максимальной однородности [1]. Кванту следующего ранга будут отвечать запасы ячейки осреднения следующего максимально однородного уровня, который, как показано в [2], обычно появляется через несколько масштабов. Запасы всего рудного тела также будут подчиняться закону масштабной периодичности, попадая, вероятно, на размер кванта некоторого ранга. Как показано в [1, 2], такой модели не противоречит строение концентрационных неоднородностей ряда месторождений золота и олова в России.

Под минимальным запасом здесь понимается содержание олова в элементе выпиленного блока (результат анализа одной грани миниблока). Таким обра-



зом, самой маленькой ячейкой рассмотрения будет половина распиленного миниблока с одной проанализированной гранью. Изменение масштаба рассмотрения обеспечивается последовательным объединением таких ячеек. Запасы в получаемых на каждом масштабном уровне объемах определяются суммированием содержаний всех входящих в них проанализированных миниблоков. Распределенные в объеме распиленного образца результаты рентгенорадиометрического анализа осреднялись посредством сглаживания объемным скользящим окном (ячейкой осреднения), которое передвигается по объему образца. Попадающие в окно значения запасов усредняются, и среднее считается пробой того же масштаба, что и размер окна. Динамика изменения запасов в таком окне с изменением его стороны является предметом анализа. В качестве осредняющих взяты 12 разноразмерных ячеек (рис. 1). Так как теоретически динамика масштабного изменения запасов в ячейке (фрактальная размерность) не зависит от геометрии ячеек, размер стороны ячейки для построения графика, взятый как кубический корень из произведения ее сторон, составил для ячейки, содержащей один проанализированный объем (минимальную ячейку осреднения), 1,26 см, два объема — 1,58, четыре — 2,00, восемь — 2,52, двенадцать — 2,88, восемнадцать — 3,30, двадцать семь — 3,77 см. Чтобы решить, соответствует ли строение образца модели самоподобного фрактала, в двойном логарифмическом масштабе строился график зависимости значений средних запасов в ячейке от размера ее сторон.

Рис. 1. Геометрия применяемых ячеек сглаживания

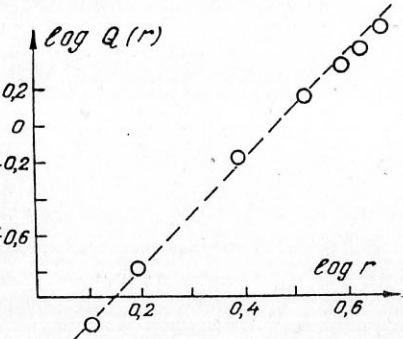


Рис. 2. Фрактальный график для образца 711-35-8

На графике (рис. 2) видно, что точки хорошо аппроксимируются прямой линией, тангенс угла наклона которой (фрактальная размерность — D) равен дробному числу (2,95). Следует отметить, что определенной подобным образом фрактальной размерности в общем случае нельзя придавать топологический смысл (0 — точка, 1 — линия, 2 — плоскость, 3 — пространство и т.д.).

В нашем случае используется не обычная геометрическая мера, а «нагруженная» некоторыми весовыми значениями. Подобные величины, если «нагружение» производится одинаковым способом (как в данном случае), можно срав-

нивать по отношению порядка (больше—меньше), но нельзя придавать им геометрический смысл.

Прямолинейная аппроксимация указывает на соответствие пространственного распределения олова в данном образце модели самоподобного фрактала. Графики для всех остальных образцов также хорошо спрямляются (коэффициент корреляции около 0,99). Результаты расчетов приведены в табл. 1. Из нее видно, что прослеживается закономерное увеличение величины фрактальной размерности D с глубиной. Возможно, это связано с большей энергетической емкостью процесса гидрообразования на глубине.

Таблица 1

Значение фрактальной размерности для штуфов

| Горизонт | Рудное тело | Блок | Фрактальная размерность штуфа, D | Средняя фрактальная размерность горизонта |
|----------|-------------|------|----------------------------------|-------------------------------------------|
| 761 | 33 | 3 | 2,60 | 274 |
| 761 | 33 | 3б | 3,08 | |
| 761 | 33 | 3н | 2,92 | |
| 761 | 33 | 7 | 2,38 | 2,95 |
| 711 | 35 | 8 | 2,95 | |
| 661 | 35/1 | 7 | 3,14 | 307 |
| 661 | 35/1 | 4 | 3,16 | |
| 661 | 35 | 16 | 3,12 | |
| 661 | 36 | 1 | 3,01 | |
| 661 | 57 | 11 | 3,02 | |
| 661 | 81 | 1 | 2,95 | 3,31 |
| 607 | 35 | 6 | 3,28 | |
| 607 | 35 | 6ж | 3,34 | |

Сравнение рассчитанных нами ранее фрактальных размерностей для разных рудных тел по запасам отработанных выемочных блоков с фрактальными размерностями этих же рудных тел, определенных по штуфам, приведено в табл. 2. Видно, что фрактальная размерность запасов по штуфам имеет те же значения, что и по выемочным блокам (в пределах допустимой погрешности), но в среднем примерно на единицу меньше. Различие, возможно, связано с тем, что при расчете величины D для выемочных блоков применялась плоская ячейка с топологической размерностью на единицу меньшей, чем объемная ячейка, применяемая для образцов. От указанного правила несколько отклоняется рудное тело 57, для которого разница составляет 0,77. Возможно, это особенность данного штуфа.

Чтобы выяснить степень упорядоченности фрактальной модели изучаемых объектов, изучены дискретность и однородность запасов металла на уровне образцов по методике исследования дискретности и однородности запасов на уровне рудных тел, разработанной нами ранее. Для каждого масштабного уровня

Фрактальная размерность запасов рудных тел на Западном участке Депутатского месторождения

| Номер рудного тела | Фрактальная размерность | |
|--------------------|-------------------------|-----------------------------|
| | по данным эксплуатации | по штуфам с горизонта 661 м |
| 57 | 2,25 | 3,02 |
| 35 | 2,15 | 3,12 |
| 36 | 2,10 | 3,01 |
| 81 | 2,00 | 2,95 |

(размера ячейки) строились гистограммы содержаний, заключенных в ячейке данного размера при «обегании» ею всего объема исследуемого образца. Можно полагать, что совместное протекание физико-химических и структурообразующих процессов образования какого-либо рудного объекта на определенном масштабном уровне находит отражение в максимально симметричной одномодальной гистограмме, иными словами, соответствует максимально упорядоченному фракталу, тогда как бимодальные гистограммы отражают рассогласованность указанных процессов [1]. Гистограммы для образцов получились не очень выразительными (рис. 3) из-за недостаточного для статистики количества материалов по отдельному образцу. Исходные данные пришлось логарифмировать, в противном случае симметричные гистограммы получить не удавалось. Средний запас в ячейке осреднения, которой соответствует максимально симметричная одномодальная гистограмма, может быть назван единицей дискретности — квантом — запасов, т.е. единичным запасом наиболее однородного масштабного уровня. Квант вычисляется как произведение объема ячейки наиболее однородного масштабного уровня на средний запас в ней. При анализе данных образцов кванты запасов имеют относительную величину, так как неизвестен коэффициент перехода между используемым содержанием и его истинным значением, но этот коэффициент примерно постоянен для всех штуфов, поэтому они допускают сравнение между собой (табл. 3).

Таблица 3

Величины квантов запасов разного масштаба

| Номер рудного тела | Размер стороны ячейки, см | Средние относительные запасы ячейки | Величина относительного кванта, q1 | Величина кванта по эксплуатации, q2 (т) | Коэффициент перехода, q1/q2 |
|--------------------|---------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------|
| 33 | 1,26 | 0,464 | 0,928 | 2328 | 2509 |
| 35 | 1,58 | 0,235 | 0,927 | 4201 | 4532 |
| 35 | 3,77 | 1,800 | 96,449 | 14938 | 6457 |
| 57 | 1,58 | 1,500 | 5,920 | 13696 | 2283 |
| 81 | 1,58 | 0,140 | 0,552 | 1452 | 2630 |

Анализируя данные табл. 3, можно отметить относительно хорошую сходимость коэффициентов перехода (q_2/q_1) для рудных тел 33, 57 и 81. Для пересчитанных тел можно умножением на средний коэффициент перехода 2400 из кванта образца вычислить «макроквант» рудного тела — единичный запас наиболее однородного масштабного уровня, для которого в качестве запасов ячеек использовались запасы выемочных блоков.

Для рудного тела 35 отмеченная закономерность не выдерживается: для него, в отличие от остальных, устанавливаются два уровня квантов, кроме того, максимальный квант рудного тела 35 является наибольшим из всех рассчитанных. Возможно, это объясняется размером и структурной позицией данного рудного тела. Во-первых, жила 35 принадлежит к рудным телам северо-западного простирания ($295^\circ-310^\circ$), тогда как все остальные жилы близширотного простирания ($270^\circ-275^\circ$). Во-вторых, жила 35 — абсолютный лидер среди всех рудных тел месторождения как по глубине распространения — не менее 600 м (глубина распространения жил 33, 57, 81 350—450 м), так и по запасам, которые превосходят запасы других изученных жил в 2,5—3,0 раза.

Выводы

1. Пространственное распределение олова на уровне образцов соответствует модели точечного самоподобного фрактала.

2. Фрактальные размерности образцов и рудных тел сопоставимы.

3. Фрактальная размерность изученных образцов закономерно возрастает с глубиной, что, возможно, связано с большей энергетической емкостью процесса рудообразования на глубинных уровнях земной коры. Таким образом, фрактальные параметры образцов могут быть использованы для оценки уровня денудационного среза рудных тел.

4. Изучение дискретности запасов олова на масштабном уровне образцов позволило рассчитать величины естественных квантов (порций) запасов и коэффициенты межуровневых переходов. Их близкие значения (в среднем 2400) создают основу для расчета «макрокванта» рудного тела по кванту образца умножением на средний коэффициент перехода.

Определение фрактальных параметров запасов металла на уровне ручных образцов может быть использовано при прогнозировании и оценке запасов на основе фрактальных статистических моделей.

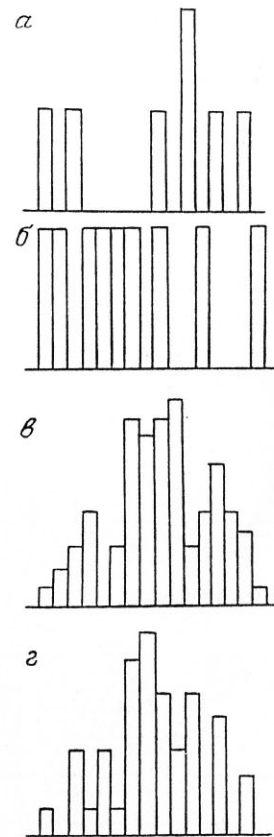


Рис. 3. Изменение вида гистограмм при увеличении ячейки осреднения (масштаба рассмотрения): образец 761-33-3б, 41 элемент; а — ячейка 1,26 см, асимметрия 0,046; б — ячейка 1,58 см, асимметрия 0,219; в — ячейка 2,52 см, асимметрия 0,652; с — ячейка 2,88 см, асимметрия 0,569

ЛИТЕРАТУРА

1. Л и р Ю. В., Ш а к и н С. С. О законах распределения запасов металлов в недрах // Руды и металлы. 1994. № 2.
2. Л и р Ю. В., Ш а к и н С. С. Фрактальный анализ концентрационных неоднородностей жильных золоторудных тел // Руды и металлы. 1995. № 4.
3. Ш а к и н С. С. Фрактальные модели и перспективы их использования в геологии // Зап. СПГГИ. 1993. Т. 137.

ВНИМИ
СПГГИ