

УДК 553.061.1:311

© М.В. Родкин, А.Р. Шатахцян

М.В. Родкин, А.Р. Шатахцян

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ДАННЫХ ПО КРУПНЫМ И СУПЕРКРУПНЫМ МЕСТОРОЖДЕНИЯМ; ЭМПИРИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ

Введение

Формирование в последние годы обширных единообразных каталогов данных по рудным месторождениям [18 и др.] позволило использовать в этой области целый ряд статистических методов анализа успешно применявшихся ранее в других областях, прежде всего в сейсмологии.

Общеизвестна огромная роль закона повторяемости землетрясений Гутенберга–Рихтера (Г–Р) в сейсмологии. Но аналогичные соотношения были выявлены позднее и во многих других областях, в частности было показано, что степенное соотношение характерно для величин запасов месторождений. Для углеводородных месторождений степенное распределение числа месторождений от величины запасов установлено достаточно надежно и используется для прогноза ожидаемого числа еще не открытых месторождений различного ранга [1, 2, 3]. В рудной геологии рядом авторов также предлагался степенной характер распределения числа месторождений от объема запасов [15], но в целом закон распределения остается дискуссионным [4]. Согласно [15], распределение величин концентрации рудной компоненты может быть описано логнормальным законом распределения. По аналогии с сейсмологией можно ожидать, что исследование законов распределения величин запасов и концентрации окажется полезным и для понимания процессов формирования месторождений.

Понятие фрактальной размерности широко используется в геофизике (хотя и нельзя сказать, чтобы результативность такого применения вполне соответствовала масштабам проведенных исследований). Для анализа точечных объектов наиболее часто используется метод расчета корреляционной размерности [16]. Применительно к расположению землетрясений подобные расчеты позволяют выявить концентрацию (кластеризацию) очагов землетрясений в квазилинейные, двумерные или объемные структуры и большую или меньшую степень пространственной концентрированности процесса разрушения. Следует, однако, иметь в

виду, что расчеты фрактальной размерности для реальных физических систем в определенной мере условны [17]. В природе наблюдается, как правило, только довольно ограниченный интервал масштабов (часто менее одного порядка величины), на котором график, используемый для определения фрактальной размерности, оставался бы достаточно прямолинейным; при этом участков прямолинейного поведения графика может быть несколько, а границы таких участков часто неоднозначны. В связи с этим иногда приводится не оценка некоего одного значения корреляционной фрактальной размерности, но отмечается, что величина этой размерности на разных масштабах различна. Такой вывод вполне обоснован, когда график для определения фрактальной размерности содержит несколько прямолинейных участков, разделенных более или менее очевидными изломами. Аналогичный подход может быть реализован применительно к любым точечным объектам.

Ниже приводятся результаты анализа характера распределения величин запасов и концентрации руды в месторождениях и результаты расчетов корреляционной фрактальной размерности расположения месторождений по материалам базы данных о крупных и суперкрупных рудных месторождениях мира. Полученные результаты свидетельствуют в пользу предложенной ранее модели формирования месторождений как побочного эффекта превращения больших масс вещества между различными по составу резервуарами тектоносферы.

Исходные данные и характер распределения величин запасов и концентраций руд

Для выполнения работы были использованы данные ГИС «Крупные и суперкрупные месторождения» (ГИС КСКМ) [6, 18], на основании которой была сформирована база данных БД по пространственному расположению, запасам и концентрациям минерального сырья в крупных и суперкрупных рудных месторождениях мира, включающая информацию о 1242 месторождениях. При компиляции БД в данных ГИС КСКМ был выявлен ряд неточностей,

о которых были проинформированы создатели ГИС. Отдельные значения в БД дополнялись и уточнялись также и по другим источникам.

Следуя результатам [5] для разных видов сырья по материалам БД был охарактеризован закон распределения числа месторождений от объема запасов и величин концентрации полезного компонента. Известно [6], что в линейных координатах точки, отвечающие крупным и суперкрупным месторождениям, оказываются на ранговом графике изолированными, что явилось основанием для вывода об особом характере процессов, приводящих к формированию уникальных крупных и суперкрупных месторождений. Однако при представлении этих же значений в двойных лог-лог координатах получаемый ранговый график оказывается вполне непрерывным и практически прямолинейным (естественно, только в области достоверно представленных крупных и крупнейших месторождений). Ситуация в данном случае полностью аналогична таковой в сейсмологии. Примеры распределений приведены на рис. 1.

Получаемые графики аналогичны известному закону повторяемости землетрясений Гутенберга–Рихтера (для величин сейсмической энергии или сейсмического момента). Действительно, при использовании величин энергии или сейсмического

момента соотношение Г–Р принимает вид степенного закона распределения с функцией распределения $F(x)$:

$$F(x) = 1 - (a/x)^b, x \geq a, \quad (1)$$

где a – параметр; показатель степени распределения, значение b , может быть рассчитан по формуле [19]

$$b = (1/n \times \sum (\ln(x_i/a))^{-1}). \quad (2)$$

Погрешность оценки b оценивается из соотношения [19, 20]:

$$\delta b = b^2/n. \quad (3)$$

В (2)-(3) индекс $i = 1, 2, \dots, n$ пробегает n значений от некоего граничного до максимального значения x . В том случае, если несколько максимальных значений x по тем или иным соображениям отбрасываются, используется другой метод определения b и δb (например, метод наименьших квадратов).

Значения показателя b степенного закона в случае месторождений и для закона Г–Р оказываются существенно различными. Для величин сейсмического момента типичное значение $b = 0,65$ [7], а для величин запасов рудных месторождений чаще имеем $b > 1$ (табл. 1). Учитывая ожидаемый эффект неполноты данных по месторождениям с относительно меньшим объемом запасов и большой статистический разброс величин крупнейших событий [7, 20], для получения более точной оценки параметра b интервал

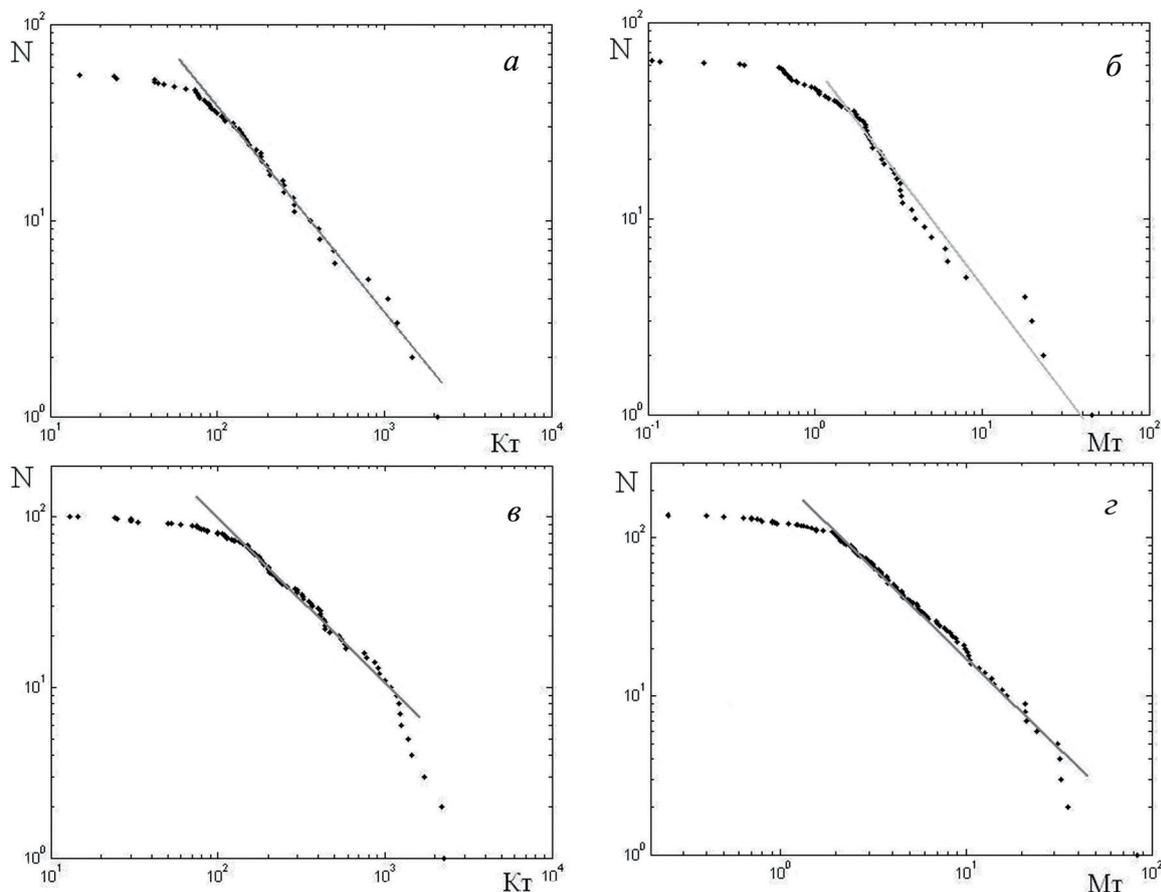


Рис. 1. Эмпирические распределения запасов месторождений кобальта (а), никеля (б), молибдена (в), цинка (г)

Таблица. 1

Параметры эмпирических распределений величин запасов и концентраций крупнейших рудных месторождений мира

№	Вещество	Число месторождений	Параметры логнормального распределения, lg(C, %)		Степенное распределение	Коэф. корреляции величин запасов и концентрации
			<i>mi</i>	<i>sigma</i>	Параметр <i>b</i> (ранговые номера месторождений)*	
Обогащение в нижней коре						
1	Ag	192	-2,6±0,12	0,9±0,1	1,31±0,12 (6-100)	0,45
2	Au	200	-3,9±0,1	0,81±0,08	1,27±0,14 (1-80)	0,38
3	Co	56	-1,00,1	0,43±0,08	1,05±0,19 (3-30)	0,11
4	Cu	212	-0,25±0,06	0,48±0,05	1,23±0,17 (2-80)	0,40
5	Ni	73	-0,03±0,09	0,37±0,06	1,03±0,18 (1-30)	0,37
6	Fe	178	1,59±0,02	0,15±0,02	0,82±0,15 (4-50)	0,15
7	TiO ₂	37	1,0±0,1	0,3±0,07	0,92±0,17 (2-25)	-0,16
Обогащение в верхней коре						
6	Pb	135	0,2±0,1	0,6±0,1	1,2±0,15 (1-60)	0,49
9	Ta ₂ O ₅	46	-1,74±0,09	0,3±0,06	0,9±0,25 (2-13)	0,06
10	U	82	-1,1±0,1	0,6±0,1	0,97±0,20 (6-60)	0,08
11	WO ₃	57	-0,71±0,15	0,6±0,1	1,1±0,17 (2-30)	0,25
12	Mo	105	-1,5±0,1	0,44±0,06	1,13±0,25 (2-60)	0,28
13	ZrO ₂	45	0,10±0,18	0,43±0,13	1,4 ±0,5 (варианты)	0,16
Без сильного обогащения на границе верхней и нижней коры						
14	алмаз	24	-4,6±0,3	0,7±0,2	0,85±0,25 (1-13)	0,11
15	Zn	139	0,55±0,09	0,57±0,07	1,1±0,11 (5-90)	0,43
16	P ₂ O ₅	80	1,12±0,08	0,37±0,06	1,0±0,4 (варианты)	0,31
17	TR ₂ O ₃	36	0,03±0,24	0,71±0,18	0,45±0,11 (1-20)	-0,14

* – использованы при расчете параметра *b* степенного закона распределения.

определения ограничивался (если это визуально необходимо) со стороны как суперкрупных, так и относительно меньших месторождений. Границы интервала, использованного для расчетов параметра *b*, указаны в таблице.

Напомним, что меньшее значение параметра *b* указывает на большую долю суммарных запасов, сконцентрированную в малом числе крупнейших месторождений. Единообразии закона распределения (рис. 2, табл. 1) указывает на однотипность процессов, приводящих к формированию месторождений разного вида сырья и разного ранга (в том числе и суперкрупных). Более подробно методика и результаты расчетов параметров степенных распределений описаны в работах [7, 20, 21].

Рядом авторов ранее рассматривался также характер распределения величин концентрации полезной рудной компоненты *C*, в результате чего был сделан вывод, что эмпирические распределения величин *C*, по-видимому, могут быть удовлетворительно

описаны логнормальным законом распределения [5, 15]. Данные из табл. 1 подкрепляют этот вывод.

Напомним, что степенной закон распределения величин запасов (для случая углеводородных месторождений) полагается надежно установленным и даже используется для прогноза числа еще не открытых месторождений разного ранга [1-3]. Для крупных и суперкрупных месторождений мира разного типа такого рода анализ другими авторами, по-видимому, не проводился.

Отметим также, что выявление характера закона распределения весьма важно и для понимания механизмов соответствующих порождающих процессов. В качестве примера достаточно сослаться на ключевую роль закона распределения землетрясений Гутенберга–Рихтера в сейсмологии. Вопрос интерпретации степенного характера распределения для величин запасов месторождений и логнормального для величин концентрации руды обсуждается в работах [5, 21]. Ниже эти представления будут использованы

в контексте интерпретации величин корреляционной фрактальной размерности расположения крупных и суперкрупных рудных месторождений.

Результаты расчетов корреляционной размерности

Расчет корреляционной размерности [16] является типичным подходом при анализе характера расположения совокупности точечных объектов. При реализации этого подхода рассчитывается число пар объектов $N(r)$ расположенных на расстоянии не более r друг от друга (выше обозначение N отвечает числу месторождений данного вида, а в данном разделе число N – число пар месторождений). Определяется наклон β прямолинейного участка графика (если таковой имеется) в координатах $\lg(N(r)) - \lg(r)$.

$$N(r) \sim r^\beta. \quad (4)$$

Обычно выбирается наиболее протяженный и удовлетворительно прямолинейный участок графика, и по нему определяется значение β . В данной работе основное внимание будет уделено попыткам выявить тенденцию в изменении наклона графика (4) в зависимости от пространственного масштаба (величин взаимных расстояний между месторождениями r).

Для построения графиков значений $N(r)$ использованы данные по относительно более обеспеченным статистическими данными видам минерального сырья: Ag, Au, Co, Cu, Fe, Mo, Ni, Pb, P_2O_5 , Ta_2O_5 , TiO_2 , TR_2O_3 , U, WO_3 , Zn, Sn, ZrO_2 , где как TR_2O_3 обозначены редкие земли.

Сразу возникает вопрос о степени достоверности получаемых результатов расчета корреляционной размерности. При расчетах величин корреляционной размерности обычно использовались подборки с числом событий равным 100 или более [22]. Опыт использования корреляционной размерности при анализе изменчивости сейсмического режима [22] показывает, однако, что в том случае, когда целью исследования является не определение (достаточно точно) значения фрактальной размерности, а только выявление тенденции ее изменчивости, допустимо использование и более малых групп, по 50 и 75 объектов. В нашем случае для многих видов сырья (Ag, Au, Mo, Cu, Fe, Zn, Pb, Sn) число месторождений превышает 100, минимальное число месторождений отвечает случаю алмазов, которые дополнительно включены в рассмотрение ввиду доказанной уникально глубинной природы источника рудного сырья. Проверка робастности результатов обеспечивается в нашем случае также единообразием результатов, получаемых при анализе данных по различным видам рудного сырья.

На рис. 2 представлены зависимости $\lg(Prob(N(r)))$ от $\lg(r)$, где N – число пар крупных и суперкрупных рудных месторождений рассматривае-

мого вида, отстоящих друг от друга на расстояние не более r км. Значения $Prob(N)$ отвечают нормировке числа N на максимальное значение числа пар (разное для разных видов сырья); в результате графики для всех видов сырья попадают в единый интервал от 0 до 1 по оси y (рис. 2).

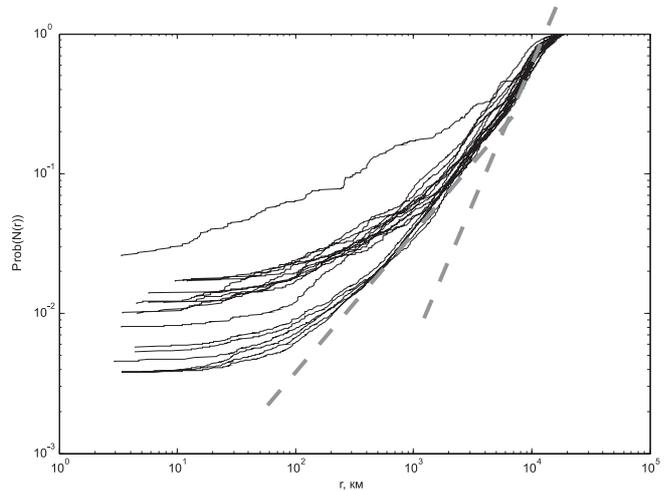


Рис. 2. Графики величин $Prob(N(r))$ от r для разных видов рудного сырья. Толстыми штрихованными линиями показаны характерные значения наклона, соответствующие корреляционным фрактальным размерностям, равным 1 и 2. Изолированная кривая отвечает случаю алмазов с минимальным (равным 41) числом месторождений в БД

Видно, что графики для разных видов сырья практически совпадают в области больших значений r . В области малых значений r графики для видов сырья с большим числом месторождений располагаются ниже (минимальные значения $Prob(N(r))$ меньше). Характер изменения наклона графика с ростом величин взаимного расстояния r единообразен для всех представленных графиков. Наклон графика существенно меньше единицы в области малых (до 100 км) значений r . В интервале расстояний r от 300 до 1000-2000 км наклон графиков близок к единице. В области примерно от 4000 до 10000 км наклон графиков близок к двум, что указывает на то, что на таких пространственных масштабах имеет место квазиравномерное распределение месторождений по поверхности Земли. На расстояниях более 20000 км наклон графиков опять уменьшается, что связано с тем, что все известные месторождения расположены на континентах и отсутствуют на акватории морей и океанов.

Рассмотрим поведение графиков $\lg(Prob(N(r)))$ от $\lg(r)$ на разных r . Малый наклон графиков на расстояниях менее 100 км порождается значительным числом пар месторождений с нулевым расстоянием (число таких пар равно числу месторождений данного вида минус единица и по условиям отбора данных таких пар не менее 100). Но, кроме этого

эффекта, сказывается и рост вероятности расположения крупного месторождения данного вида минерального сырья в ближайшей окрестности другого аналогичного месторождения. На рис. 3 представлены данные о минимальных R_{min} расстояниях между несовпадающими месторождениями данного вида сырья в зависимости от числа месторождений этого вида в базе данных (табл. 1, второй столбец). На том же рисунке приведены результаты численного моделирования величин минимального расстояния между месторождениями при условии их случайного равномерного расположения по поверхности континентов. Видно, что при случайном равномерном распределении значения R_{min} должны были бы быть на порядок больше. Исходя из характера графиков на рис. 2 и из величин минимального расстояния между различными крупными месторождениями данного вида можно полагать, что область концентрирования месторождений на малых относительных расстояниях имеет размер в нескольких десятков (иногда до 100) километров.

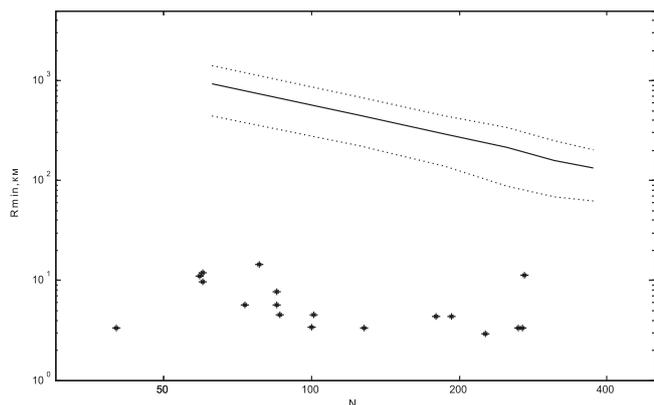


Рис. 3. Зависимость минимального расстояния между месторождениями R_{min} от числа месторождений N для различных видов рудного сырья (звездочки) и для искусственных примеров, рассчитанных в предположении равномерного распределения месторождений (сплошная и пунктирные линии)

Приближающийся к единице наклон графиков в интервале от (примерно) 300 до 1000–2000 км предположительно связан с тем, что на таких масштабах месторождения оказываются приуроченными к региональным линейным зонам размером от сотен до тысячи и более километров. Этот результат не является неожиданным. Уже при визуальном анализе карты расположения крупных и суперкрупных месторождений легко заметить, что некоторые группы близко расположенных месторождений располагаются вдоль линий, обычно ориентированных параллельно современным и палеограницам тектонических плит.

Новым результатом является выраженность этой закономерности для всех рассмотренных видов

минерального сырья, даже и для тех, для которых такая линейная вытянутость близкорасположенных крупных месторождений визуально явственно не выявляется. Этот результат не тривиален. Вообще говоря, можно было бы предположить, что месторождения некоторых видов руд приурочены к большим по размеру (сотни километров в диаметре) плюмам. В этом случае можно было бы ожидать, что расположение месторождений в пределах плюма будет равномерным по площади, а величина корреляционной размерности окажется близка к двум. Полученный характер изменчивости величин $\lg(Prob(N(r)))$ от $\lg(r)$ получается в тех случаях, когда соседние месторождения (на расстояниях в сотни километров) приурочены к неким случайным образом ориентированным линейным структурам. Полученные близкие к единице значения корреляционной размерности β на масштабе первых сотен-тысячи километров указывают, что плюмы такого размера, по-видимому, не играют существенной роли в характере локализации крупных и суперкрупных месторождений (по крайней мере, для рассмотренных видов рудного сырья).

Для всех рассмотренных видов рудного сырья величина корреляционной размерности на масштабах от 4000–5000 до 10 000–15 000 км становится близкой к двум. Это указывает, что на таких масштабах доминирует квазиравномерное распределение месторождений по площади. Такое заключение согласуется с тем, что континентальные плиты являются конгломератом террейнов, состыкованных случайным образом. Отсюда можно было ожидать, что на масштабе размеров террейнов расположение месторождений окажется равномерным по площади (со значением b близким к двум).

На масштабах более 10 000–15 000 км величина корреляционной размерности снова уменьшается. Характерный размер в этом случае соответствует размеру континентов. Резонно предположить, что уменьшение наклона графика $\lg(Prob(N(r)))$ от $\lg(r)$ в этом диапазоне масштабов связано с тем, что все указанные в БД месторождения располагаются на континентах и отсутствуют на акватории океанов.

Суммируя вышесказанное, получаем, что характерной особенностью пространственного расположения крупных и суперкрупных рудных месторождений является их приуроченность к линейным структурам. В отдельных случаях это видно визуально. При этом такие структуры практически всегда ориентированы вдоль границ плит и крупных блоков. Отсюда заключаем о преимущественной приуроченности крупных и суперкрупных месторождений к границам тектонических плит и террейнов. Отметим, что такая особенность локализации находит некую аналогию в расположение

углеводородных месторождений – для последних довольно типично развитие региональных поясов нефтегазоносности.

Обсуждение

Обсудим теперь вопрос, каковы могли бы быть механизмы формирования крупных и суперкрупных рудных месторождений, чтобы они обеспечивали эмпирически выявляемый характер распределения величин запасов и концентрации руды в месторождениях и чтобы характер пространственного расположения месторождений отвечал результатам расчетов корреляционной фрактальной размерности пространственного распределения совокупности крупных и суперкрупных месторождений.

Вспомним, прежде всего, наиболее общие схемы реализации логнормального и степенного распределений. Логнормальный закон распределения величин концентраций естественно трактовать как следствие формирования месторождений в результате нескольких последовательных эпизодов концентрирования рудной компоненты. В этом случае логнормальный закон возникает как естественный результат перемножения коэффициентов обогащения на каждом из этих этапов. Такая модель представляется вполне правдоподобной. Действительно, полистадийность процессов формирования крупных месторождений отмечается в обобщающей монографии [4] как характерная черта процессов рудогенеза.

Перейдем к случаю степенного распределения. В [8, 21] для случая УВ месторождений (распределение запасов которых, как выше сказано, также подчиняется степенному закону) рассматривается модель, в значительной мере аналогичная использованной ранее для интерпретации графика повторяемости землетрясений Гутенберга–Рихтера [9]. А именно, предполагается формирование степенного закона распределения как результата множества случайных по длительности процессов (квази)лавинообразного заполнения потенциальных ловушек УВ. В пользу правдоподобности такого режима формирования УВ месторождений свидетельствуют признаки их современного пополнения, причем скорость такого пополнения, в среднем, оказывается пропорциональной объему запасов данного месторождения [10, 11], что как раз и отвечает возникновению необходимой для реализации степенного закона распределения цепи положительной обратной связи.

Для случая рудных месторождений также имеются свидетельства их современного восполнения [12]. В целом, однако, механизм быстрого (в геологическом смысле) и лавинообразного формирования рудных месторождений вряд ли может считаться типичным. Поэтому для случая рудных

месторождений мы предлагаем иную модель, когда степенное распределение величин запасов реализуется на основе логнормального закона распределения, модифицированного возникновением цепи положительной обратной связи.

На рис. 4 видна неожиданно тесная связь значений разницы концентрации рудных компонент в среднем составе верхней и нижней коры (по данным [13], табл. 2.15 и 4.4) с характерными значениями величин запасов крупных месторождений минерального сырья разного вида [4, Т. 1, табл. 1.2]; аналогичная зависимость выполняется для запасов суперкрупных месторождений из той же таблицы). Коэффициент корреляции разности концентраций и характерных величин запасов крупных месторождений $r = 0,98$, притом что корреляция со значениями концентрации соответствующих компонент в верхней и нижней коре по отдельности несколько меньше. Отсюда можно предположить, что решающее значение имеет именно разность концентраций, а не среднее содержание соответствующего компонента в земной коре.

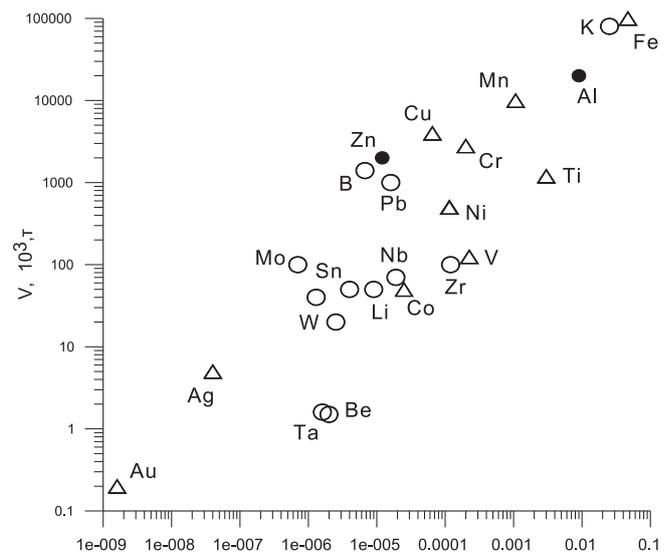


Рис. 4. Связь разницы ΔC средних концентраций элементов в верхней и нижней коре с характерными значениями запасов крупных месторождений V . Кружками даны случаи сильного обогащения в верхней части коры, треугольники отвечают обогащению нижней коры, точки – без заметного обогащения

Исходя из выявленной корреляции, можно предположить, что формирование крупных рудных месторождений является побочным следствием преобразования больших объемов земной коры из одного по составу резервуара земной коры или мантии в другой. Вследствие различия состава резервуаров при формировании новообразуемого резервуара на границе превращения накапливается излишек компонент, содержание которых в старом резервуаре было выше. Этот пополняемый процессом превращения

излишек вещества и становится исходным сырьем для формирования месторождений. Физическим механизмом концентрирования рудных компонент может быть при этом процесс отделения относительно менее совместимых компонент в процессах метаморфических превращений и/или плавления горных пород [14, 23]. В рамках предложенной схемы максимально возможный объем запасов месторождения задается произведением объема подвергшейся преобразованию горной породы на разницу средних концентраций рудного компонента в исходном и конечном резервуарах. При этом перемножение линейных размеров охваченной преобразованием области создает предпосылки для формирования логнормального закона распределения.

Важным частным случаем области преобразования вещества земной коры являются зоны глубинных надвигов, где вещество верхней коры в процессе погружения преобразуется в вещество нижней коры. Процесс подвига реализует как бы конвейерную ленту, на которой в глубокие горизонты земной коры на переработку подаются все новые порции верхнекорового субстрата. В рамках предложенной модели при этом создаются условия для возникновения месторождений компонент с повышенным содержанием в верхней коре. Если исходить из характерных объемов запасов крупных месторождений по [4, Т. 1, табл. 1.2, с. 30], ожидаемых объемов пододвигаемых пород, и разницы концентраций соответствующих компонент в верхней и нижней коре [13], то типичную эффективность «сбора» избыточного вещества в месторождениях можно оценить в сотые доли процента и менее. Такая эффективность предполагаемого процесса представляется правдоподобной.

Отметим, что в рамках такой схемы понятен механизм формирования положительной корреляции величин запасов месторождений и концентрации в породе полезной компоненты. Действительно, чем большие объемы вещества перерабатываются, тем большее по объему запасов месторождение может образоваться и тем более длительный процесс последовательного концентрирования рудной компоненты имеет место. Требуемая объяснения положительная коррелированность величин запасов и концентраций, типичная для большинства видов рудных месторождений, видна из последнего столбца таблицы.

Подчеркнем, что для реализации наблюдаемого степенного закона распределения описанной схемы недостаточно и необходим также дополнительно некий механизм положительной обратной связи, обеспечивающий преимущественное развитие более крупных месторождений. Такой механизм вполне естественно возникает ввиду коррелированности линейных размеров преобразуемых объемов

земной коры. Действительно, эти размеры не независимы, большие или меньшие размеры области по одному направлению статистически коррелируют с размерами по другим направлениям. Применительно к глубинным надвигам такая корреляция отвечает известной эмпирической закономерности, что большим по мощности зонам надвигов отвечают обычно и большие амплитуды и скорости надвиговых движений.

Отметим, что результаты расчетов корреляционной фрактальной размерности согласуются с предложенной моделью, так как свидетельствуют о приуроченности месторождений к региональным линейным структурам, предположительно отвечающим зонам преобразования вещества тектоносферы между различными резервуарами.

Заключение

Создание в последние годы больших единообразных баз данных по рудным месторождениям позволяет использовать в этой области целый ряд не применявшихся ранее методов статистического анализа. Рассмотрены эмпирические распределения величин запасов и концентраций руд и произведены расчеты фрактальной размерности расположения месторождений. Для месторождений разного вида рудного сырья наблюдается однотипный степенной характер распределения для величин запасов и логнормальный для значений концентрации рудной компоненты. Изменчивость и значения величин фрактальной корреляционной размерности также единообразны для разных видов рудного сырья. На малых расстояниях (первые десятки до сотни километров) наблюдаются малые значения размерности и соответственно весьма высокая степень концентрации месторождений. Величины расстояний между ближайшими месторождениями одного типа систематически много меньше, чем это имело бы место в случае их равномерного распределения по поверхности Земли. На масштабе от 100 и до 1000 км в локализации крупных и суперкрупных рудных месторождений доминирует приуроченность к линейным объектам (предположительно границам плит и террейнов). На масштабе от нескольких тысяч до 10 тысяч км величины корреляционной размерности близки к двум, а локализация месторождений приближается к равномерной по поверхности. На еще больших масштабах значения размерности определяются расположением месторождений исключительно в пределах континентов и отсутствием их на акваториях морей и океанов. Наиболее важной характерной особенностью пространственного размещения крупных и суперкрупных рудных месторождений представляется их приуроченность к линейным структурам, предположительно

отвечающим активным границам тектонических плит и террейнов. Нечто подобное характерно также и для УВ месторождений, для которых, как известно, типично развитие региональных и надрегиональных поясов нефтегазоносности.

Выявленные закономерности, а также тесная корреляция разницы концентраций рудных компонент в среднем составе верхней и нижней коры с характерными величинами запасов месторождений соответствующего вида сырья находят возможную интерпретацию в рамках модели генезиса рудных (и углеводородных) месторождений как попутного эффекта превращений больших объемов вещества между различными по составу резервуарами тектоносферы.

Авторы признательны Е.М. Граевой, принимавшей участие в подготовке БД. Работа была частично поддержана фондом РФФИ, проект 11-05-0066.

Ключевые слова: величины запасов и концентраций рудных месторождений, корреляционная размерность, процессы формирования месторождений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бурштейн Л.М. Статистические оценки параметров распределения скоплений нефти по величине в слабоизученных седиментационных бассейнах // Геология и геофизика. – 2006. – Т. 47, № 9. – С. 1013-1023.
2. Конторович А.Э., Демин В.И. Прогноз количества и распределения по запасам месторождений нефти и газа // Геология и геофизика. – 1979. – № 3. – С. 37-46.
3. Конторович А.Э., Демин В.И., Страхов И.А. Закономерности выявления различных по запасам месторождений нефти и газа в нефтегазоносных бассейнах // Геология и геофизика. – 1985. – № 11. – С. 3-16.
4. Крупные и суперкрупные месторождения рудных полезных ископаемых: в 3 т. / Д.В. Рундквист и др.; гл. ред. Д.В. Рундквист. – Т. 1: Глобальные закономерности размещения. – М.: ИГЕМ РАН, 2006. – 390 с.
5. Родкин М.В., Зотов И.А., Граева Е.М., Лабунцова Л.М., Шатахян А.Р. Степенные распределения в рудо- и нефтегенезе – интерпретация и порождающие механизмы // Российский журнал наук о Земле. – 2010. – Т. 11, № 3. – doi: 10.2205/2009ES000408.
6. Ткачев А.В., Рундквист Д.В., Черкасов С.В., Вишневецкая Н.В. и др. База данных крупных и суперкрупных месторождений мира. В: Крупные и суперкрупные месторождения рудных полезных ископаемых. – ИГЕМ РАН, 2006. – Т. 1. – С. 21-49.
7. Писаренко В.Ф., Родкин М.В. Распределения с тяжелыми хвостами: приложения к анализу катастроф // Вычислительная сейсмология. – Вып. 38. – М.: ГЕОС, 2007. – 240 с.
8. Родкин М.В. Степенное распределение запасов УВ в месторождениях: модели генерации и связь с процессами восполнения запасов в разрабатываемых месторождениях // Генезис углеводородных флюидов и месторождений. – М.: ГЕОС, 2006. – С. 84-92.
9. Родкин М.В. Кумулятивный и мультипликативный каскады как модели типизации и механизмов развития катастроф // Геоэкология. – 2001. – № 4. – С. 320-328.
10. Муслимов Р.Х. Потенциал фундамента нефтегазоносных бассейнов // ТЭК. – 2004. – № 2. – С. 142-153.
11. Родкин М.В. Модель образования гигантских месторождений по механизму положительной обратной связи // Синергетика геосистем. – М.: ГЕОС, 2007. – С. 67-72.
12. Красный Л.И., Красный М.Л. Значение возобновляемости минеральных ресурсов в геологии полезных ископаемых. – ДАН РАН, 2008. – Т. 418. – № 3. – С. 356-360.
13. Тейлор С.Р., Мак-Леннан С.М. Континентальная кора, ее состав и эволюция. – М.: Мир, 1988. – 383 с.
14. Урусов В.С., Таусон В.Л., Акимов В.В. Геохимия твердого тела. – М.: ГЕОС, 1997. – 502 с.
15. Tutcotte D.L. Fractals and chaos in geology and geophysics. – 2nd ed. – Cambridge Univ. Press, 1997. – 398 p.
16. Hentschet H., Procaccia I. The infinite number of generalized dimensions of fractals and strange attractors // Physica. – 1983. – D 8. – P. 435-444.
17. Molchan G., Kronrod T. The fractal description of seismicity // Geophys. J. Int. – 2009. – V. 179. – P. 1787-1799.
18. Largest Mineral Deposits of the World: CD-ROM // Commission on Geological Map of the World, 2006.
19. Hill B.M. A simple general approach to inference about the tail of distributions // Ann. Statistics. – 1975. – V. 3. – P. 1163-1174.
20. Pisarenko V., Rodkin M. Heavy-Tailed Distributions in Disaster Analysis // Advances in Natural and Technological Hazards Research. – V. 30, Springer, Dordrecht-Heidelberg-London-New York, 2010. – DOI: 10.1007/978-90-481-9171-0. – 190 p.
21. Rodkin M.V., Gvishiani A.D., Labuntsova L.M. Models of generation of power laws of distribution in the processes of seismicity and in formation of oil fields and ore deposits // Russian Journal of Earth Sciences. – 2008. – V. 10. – № 5.
22. Mandal P., Rodkin M.V. Seismic imaging of the 2001 Bhuj Mw 7.7 earthquake source zone: b-value, fractal dimension and seismic velocity tomography studies // Tectonophysics. – 2011. – 512. – P. 1-11.
23. Frank S., Stiller H., Seifert W. Effects of high temperature phase transitions on chemical differentiation // High Pressure Investigations in Geosciences. – Berlin: Akademie-Verlag, 1989. – P. 195-203.