

МОДЕЛЬ ОБРАЗОВАНИЯ ГИГАНТСКИХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПО МЕХАНИЗМУ ПОЛОЖИТЕЛЬНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ

М.В.Родкин

Геофизический центр РАН, Москва, 119296, Молодежная 3,
m.rodkin@gcras.ru

Известно, что минеральные запасы распределены крайне неравномерно, значительная их часть сосредоточена в малом числе гигантских месторождений. Математическим отражением такой закономерности является то, что распределение величин запасов в месторождениях разного вида сырья как углеводородного УВ (Конторович и др, 1985; Бурштейн, 2006; и др.), так и, видимо, рудного (Turcotte, 1997; Крупные и суперкрупные ..., 2004; Largest Mineral Deposits ..., 2006; и др.), часто оказывается близким к степенному закону распределения. Отсюда, при обсуждении проблемы генезиса гигантских месторождений минерального сырья, резонно задаться вопросом о возможных механизмах реализации степенных законов распределения. Ответ на этот вопрос сложнее, чем в случае более привычных, и еще более широко распространенных в природе нормального и экспоненциального закона распределения. Ниже рассмотрен ряд элементарно простых моделей, приводящих к формированию степенных законов распределения числа месторождений в зависимости от величины запасов. Такой анализ оказывается полезным для лучшего понимания процессов формирования месторождений.

Будем полагать, что число N месторождений с объемом запасов не менее V отвечает степенному соотношению, аналогичному распределению числа землетрясений в зависимости от величин энергии или сейсмического момента:

$$N(V) \cong K \times V^{-\beta}, \quad (1)$$

где K – некий коэффициент, β - показатель степени распределения, при этом значение β часто оказывается близким к единице. Для месторождений УВ степенной закон распределения выполняется настолько хорошо, что используется на практике для оценки числа еще неоткрытых в данном регионе месторождений данного класса (Конторович и др., 1985; Бурштейн, 2006; и др.). Для рудных месторождений соотношение (1) выполняется, по-видимому, только для крупных месторождений. В качестве примера такой аппроксимации на рис.1 по данным [Largest Mineral ..., 2006] дано распределение величин запасов для 8 крупнейших в мире Pb-Zn месторождений (в стоимостном выражении величины запасов).

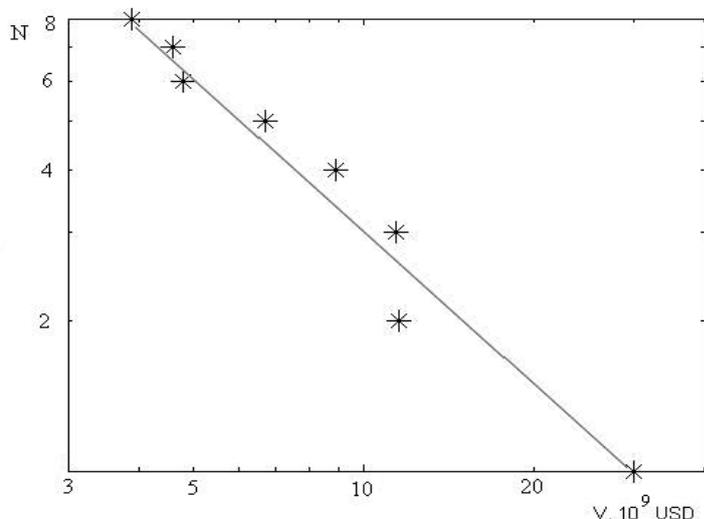


Рис.1. Распределение величин суммарных запасов 8 крупнейших в мире месторождений Pb-Zn (величина запасов V дана в стоимостном выражении, миллиарды долларов). Видно, что эмпирические данные достаточно хорошо описываются степенным законом с показателем степени близким к единице, $\beta=1.03$. По данным (Largest Mineral ..., 2006).

Для случая сейсмичности простой (но, при этом, весьма содержательной) моделью является модель реализации степенного распределения в результате совокупности эпизодов развития случайных лавинообразных процессов, когда скорость нарастания процесса \dot{x} статистически связана с его текущим значением x [Родкин, 2001]

$$\dot{x} = kx, \quad (2)$$

где k – случайная величина с положительным средним значением, а лавинообразный процесс (2) на каждом последующем шаге (в единицу времени) с вероятностью p может продолжиться, или прерваться с вероятностью $(1-p)$.

Модель (2) отвечает свойству иерархичности сейсмического процесса и описывает ряд характерных черт сейсмического режима, в частности тенденцию уменьшения величин наклона графика повторяемости в окрестности сильных землетрясений. В случае месторождений УВ применение такой модели представляется возможным. Действительно, существуют многочисленные данные, свидетельствующие о (геологической) молодости месторождений нефти и газа. При этом (Муслимов, 2006; Родкин, 2006; и др.), выявляется факт современного пополнения запасов месторождений УВ, более того, имеющиеся данные допускают интерпретацию, свидетельствующую о специфическом характере пополнения, когда скорость пополнения оказывается примерно пропорциональной запасам УВ в месторождении. Как легко видеть, именно такой режим пополнения следует ожидать, если формирование месторождений реализуется в соответствии с моделью лавинообразного процесса (2).

Тем не менее, несмотря на такую аналогию, лавинообразная модель представляется маловероятной в большинстве случаев формирования месторождений. Более вероятно, что в большинстве случаев процесс формирования месторождений, в особенности рудных – процесс длительный, и при этом вряд ли лавинообразный. Отсюда видно, что модель быстропротекающего лавинообразного процесса, успешно использованная для моделирования сейсмичности, вряд ли приложима в данном случае. Можно предположить, что в случае формирования месторождений, замыкание цепи положительной обратной связи реализуется иным способом. Например, за счет изменения вероятности продолжения формирования месторождения (большие по объему месторождения накапливаются дольше). Указания на относительно большую длительность формирования крупных и суперкрупных месторождений действительно имеют место (Крупные и суперкрупные ... , 2004). Однако, в такой модели, длительность формирования малых и суперкрупных месторождений различалась бы на порядки величины, в $10^3 - 10^4$ раз, и для формирования особо крупных месторождений было бы (возможно) недостаточно всего времени существования Земли. Эмпирические данные в пользу столь сильных различий времени формирования разных по объему запасов месторождений, как представляется, отсутствуют.

Остается (видимо) единственный фактор, могущий (в рамках используемой элементарной модели) привести к требуемому степенному распределению числа месторождений в зависимости от величины запасов - степенное же распределение средних величин скорости накопления запасов. Такое предположение представляется, впрочем, вполне естественным. Действительно, формирование эндогенных месторождений полагается связанным с разгрузками флюидомагматических потоков. Величины этих потоков определяются свойствами соответствующих магматических диапиров и интрузий и проницаемостью зон нарушений, по которым происходит разгрузка флюидомагмапоток. Структуру тектонических нарушений (а также диапиров, в определенном интервале масштабов), как известно, принято считать самоподобной и иерархической. Отсюда резонно предположить, что флюидные потоки, отвечающие структурам разного иерархического ранга, также обладают свойством самоподобия и иерархичности.

Рассмотрим предельно простую стохастическую модель такого процесса. Предположим, что процесс накопления запасов в месторождении может на каждом шаге с вероятностью p продолжиться, или, с вероятностью $(1-p)$, прекратиться. Среднюю скорость накопления запасов для каждого месторождения зададим величиной некоторого члена Y_i сгенерированной ранее степенной зависимости с типичным значением показателя степени $\beta=1$. Величину роста запасов i -го месторождения X_i на очередном шаге зададим в виде произведения величины средней интенсивности эндогенного потока Y_i (фиксированной для данного месторождения) на

случайную величину rand , например, равномерно распределенную в интервале $[0, 1]$. Начальный объем запасов в месторождении X_0 естественно положить равным нулю. Полагая, например, вероятность p равной 0.5, имеем, что на каждом шаге выполняется соотношение

$$\begin{aligned} &\text{Если } \text{rand}_1 > 0.5, \text{ то} \\ &X_i = X_i + \text{rand}_2 \times Y_i. \end{aligned} \quad (3)$$

Если очередное $\text{rand}_1 < 0.5$, то формирование данного месторождения прекращается и за величину запасов принимается значение X_{i-1} , каким оно сформировалось к данному моменту.

В используемой модели распределение средней скорости пополнения запасов месторождений по степенному закону моделирует известное свойство иерархичности геологической среды, например иерархичность системы разломов. А случайный характер пополнения, выражающийся произведением средней скорости пополнения на случайную величину rand – случайный характер функционирования питающей месторождение системы. Оба эти условия представляются естественными и даже необходимыми. Таким образом, модель (3) вполне правдоподобна в своих предположениях, и при этом предельно проста. Отсюда можно надеяться, что основные закономерности модели будут отвечать основным закономерностям моделируемого процесса формирования месторождений.

На рис.2 даны графики распределения полученных модельных величин запасов X при разном числе K эпизодов формирования месторождений: $K=100, 1000, 10000, 100000$. Так как вероятность продолжения формирования месторождения на каждом шаге $p=0.5$, то процесс формирования месторождений реально начинается только в половине случаев. Отсюда число сформировавшихся месторождений близко соответственно к 50, 500, 5000 и 50000. Видно, что полученные распределения подобны, при этом, однако, степенной характер распределения (с близким к единице значением показателя степени β) соблюдается только для относительно больших по размеру запасов месторождений. Для меньших по объему запасов месторождений график сильно отклоняется от степенного распределения в сторону существенно меньшего числа месторождений. При этом такое поведение является принципиальной особенностью модели, и не может быть удалено варьированием несущественных параметров модели.

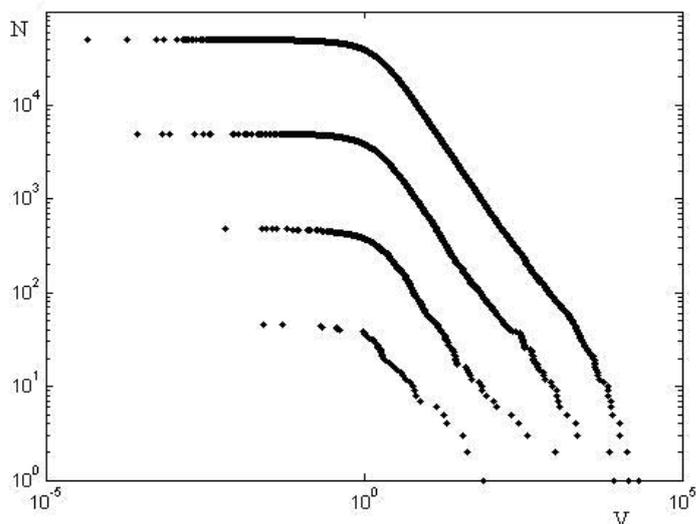


Рис. 2. Модельные распределения числа месторождений от величины запасов для числа эпизодов формирования месторождений $K=100, 1000, 10000$ и 100000 . Начальные запасы равны нулю, вероятность продолжения процесса формирования месторождения на каждом шаге $p=0.5$. Теоретический наклон графика повторяемости $\beta=1$. По оси x – величины запасов V , по оси y – число месторождений N . Видно, что число месторождений с меньшим объемом запасов меньше их числа, ожидаемого в рамках чисто степенного закона распределения.

Полученная закономерность – относительно меньшее, чем следовало ожидать исходя из степенного закона распределения, число месторождений с меньшим объемом запасов – хорошо известна по эмпирическим данным (Конторович и др., 1985; Бурштейн, 2006; Крупные и суперкрупные ..., 2004). Такое отклонение принято объяснять тем, что меньшие по объему месторождения труднее обнаружить. Предположение об относительно меньшей вероятности обнаружения малых месторождений весьма правдоподобно и видимо соответствует реальности, но используемая модель дает основания предположить несколько более сложное объяснение этого явления. А именно, она дает основание предположить, что и реальное число малых

месторождений может быть меньше, чем можно было бы ожидать, исходя из чисто степенного закона распределения. Отметим, что учет такого отклонения числа месторождений от ожидаемого их числа (если оно подтвердится в ходе дальнейших исследований) представляется весьма важным при выработке стратегии недропользования и геологоразведочных работ в традиционных и новых регионах добычи.

Попробуем проверить полученный модельный результат. Можно ожидать, что отношение числа выявленных месторождений нефти к их реальному (здесь теоретически ожидаемому) числу будет возрастать с улучшением изученности бассейна. Резонно предположить, что такая закономерность будет проявляться и для крупных и для мелких месторождений, для мелких даже несколько лучше, в свете большей статистической обеспеченности. Такая проверка, по данным (Бурштейн, 2006), была проведена в (Тюпкин и др., 2006). Выяснилось, что рост доли выявленных месторождений с ростом изученности действительно наблюдается для крупных, но не для мелких месторождений. Возможно, что такое поведение связано с некорректностью оценки ожидаемого числа мелких УВ месторождений путем экстраполяции эмпирического закона распределения крупных месторождений в область малых месторождений.

Модель позволяет также исследовать качественное поведение совокупности месторождений после завершения процесса их формирования. Предположим, что аналогичные заполнению процессы будут описывать и процессы распада месторождений. Рассмотрим два варианта модели распада УВ месторождений. Скорость распада может определяться параметрами соответствующей питающей разломной системы Y_i (аналогично тому, что имело место при формировании месторождений; при этом разломы, по которым происходит вынос вещества из месторождений рассматриваются как продолжение питающих его разломов). Согласно второму варианту подхода, скорость распада месторождения определяется величиной его текущих запасов X_i . Будем полагать механизм потери УВ сырья на каждом шаге пропорциональным одной из этих величин (или X_i , или Y_i). Среднюю скорость распада месторождения положим в 100 раз более медленной, чем скорость его накопления. Такое предположение представляется правдоподобным и призвано моделировать наличие изолирующих покрышек в приповерхностном осадочном слое и уменьшение растворимости большинства полезных компонент при более низких температурах в приповерхностных горизонтах. Проведенное численное моделирование дает в обоих указанных случаях сохранение степенного закона распределения на этапе распада месторождений.

Работа выполнена при поддержке Программы ОНЗ-2 Президиума РАН и РФФИ, грант №06-05-64334.

Список литературы

- Бурштейн Л.М. Статистические оценки параметров распределения скоплений нефти по величине в слабоизученных седиментационных бассейнах. *Геология и геофизика*, 2006, 47, №9, 1013-1023.
- 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, 3-16.
- Крупные и суперкрупные месторождения. Закономерности размещения и условия образования. М., 2004, 432 с.
- Родкин М.В. Кумулятивный и мультипликативный каскады как модели типизации и механизмов развития катастроф. *Геоэкология*, 2001, №4, 320-328.
- Родкин М.В. Степенное распределение запасов УВ в месторождениях: модели генерации и связь с процессами восполнения запасов в разрабатываемых месторождениях. В кн.: *генезис углеводородных флюидов и месторождений*. М., ГЕОС, 2006, 84-92.
- Тюпкин Ю.С., Родкин М.В., Гвишиани А.Д., Лабунцова Л.М. Очаг неравновесного процесса в сейсмологии и в геологии полезных ископаемых: общие подходы и простые модели. *Геофизические исследования*, Вып.2, ИФЗ РАН, М., 2006-2007, (В печати).
- Largest Mineral Deposits of the World*, CD-ROM, Commission on Geological Map of the World, 2006.
- Turcotte D.L. Fractals and chaos in geology and geophysics. Cambridge, 1997, 398 pp.