

ТРУДЫ МЕЖДУНАРОДНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ
Итоги Электронного Геофизического Года
3–6 июня 2009 • Переславль-Залесский, Россия

Степенные распределения в рудо- и нефтегенезе – интерпретация и порождающие механизмы

М. В. Родкин,^{1,2} И. А. Зотов,³ Е. М. Граева,² Л. М. Лабунцова,² и А. Р. Шатахцян²

Получено 26 ноября 2009; принято 11 декабря 2009; опубликовано 22 января 2010.

Хорошо известна огромная роль закона повторяемости землетрясений Гутенберга–Рихтера в сейсмологии. Этот закон – первое ставшее широко известным эмпирическое степенное распределение с тяжелым хвостом. В дальнейшем аналогичные соотношения были обнаружены и во многих других природных процессах, что, как принято считать, указывает на неравновесный динамический характер этих процессов. В частности, было обнаружено, что степенное соотношение выполняется для величин запасов крупных месторождений полезных ископаемых. Реализация степенного закона распределения накладывает определенные требования на возможный характер процессов, порождающих такие распределения, в частности, на процессы формирования месторождений. Такие ограничения рассматриваются в плане указаний на характер процессов рудо- и нефтегенеза. Обсуждаются особенности степенных распределений для разных видов минерального сырья и возможность использования этих особенностей как прогнозных признаков развития процессов массивированного рудо- и нефтегенеза. **КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** величина запасов месторождения, степенное распределение, формирование рудных месторождений.

Ссылка: Родкин, М. В., И. А. Зотов, Е. М. Граева, Л. М. Лабунцова, и А. Р. Шатахцян (2010), Степенные распределения в рудо- и нефтегенезе – интерпретация и порождающие механизмы, *Росс. жс. наук о Земле*, 11, RE3005, doi:10.2205/2009ES000408.

Введение

Общеизвестна огромная роль закона повторяемости землетрясений Гутенберга–Рихтера (Г–Р) в сейсмологии. Этот закон – первое ставшее широко известным эмпирическое степенное распределение с тяжелым хвостом. Современная система представлений в сейсмологии сформировалась в значительной мере под влиянием закона Г–Р. В дальнейшем аналогичные соотношения были выявлены и во многих других областях, в частности, было обнаружено, что степенное соотношение характерно для величин запасов месторождений полезных ископаемых, как углеводородных, так и рудных. Обычно полагают, что распределение величин запасов месторождений

описывается степенным соотношением, и что распределение величин концентрации рудных компонент описывается логнормальным законом [Бурштейн, 2006; Конторович и др., 1985; Родкин, 2006, 2007; Rodkin et al., 2008; Turcotte, 1997, и др.]. Для углеводородных (УВ) месторождений степенное распределение числа месторождений от величины запасов выполняется настолько хорошо, что используется для прогноза ожидаемого в данном регионе числа еще не открытых месторождений данного ранга [Бурштейн, 2006; Конторович и др., 1985]. В рудной геологии характер распределения числа месторождений от объема запасов остается пока дискуссионным [Рундквист и др., 2006].

Представляется ожидаемым, что (по аналогии с сейсмологией) исследование законов распределения величин запасов и величин концентрации окажется весьма полезным для понимания процессов рудо- и нефтегенеза. Действительно, выполнение степенной, аналогичной закону Г–Р, зависимости числа месторождений от величины запасов дало бы дополнительное веское основание трактовать процессы рудо- и нефтегенеза как порождае-

¹МИТП РАН, Москва, Россия

²Геофизический центр РАН, Москва, Россия

³ИГЕМ РАН, Москва, Россия

Табл. 1. Характер закона распределения величин запасов для различных видов рудного сырья

| Рудная компонента, единица измерения | Число крупных месторождений с известным объемом запасов | Показатель степени β | Характер графика в области крупнейших месторождений |
|---|--|-------------------------------|---|
| Значительное относительное обогащение в нижней коре | | | |
| Ni, Мт | 68 | 1.05 ± 0.14 | прямолинеен |
| Au, т | 191 | 1.37 ± 0.13 | прямолинеен |
| Cu, Мт | 186 | 1.24 ± 0.12 | прямолинеен |
| Ag, т | 180 | 1.41 ± 0.14 | прямолинеен |
| Co, Кт | 57 | 1.03 ± 0.18 | прямолинеен |
| TiO ₂ , Мт | 63 | 0.89 ± 0.15 | прямолинеен |
| Fe, Мт | 175 | 0.79 ± 0.08 | загиб |
| Без значительного обогащения | | | |
| Алмаз, Мкр | 24 | 0.86 ± 0.23 | прямолинеен |
| Zn, Мт | 144 | 1.1 ± 0.11 | загиб |
| P ₂ O ₅ , Мт | 67 | 0.88 ± 0.14 | загиб |
| TR ₂ O ₃ , Кт | 36 | ? | |
| Значительное обогащение в верхней коре | | | |
| Pb, Мт | 127 | 1.16 ± 0.13 | прямолинеен |
| WO ₃ , Кт | 46 | 1.03 ± 0.20 | загиб |
| U, Кт | 77 | 0.92 ± 0.14 | загиб |
| Ta ₂ O ₅ , Кт | 31 | 0.69 ± 0.16 | загиб |
| Mo, Кт | 104 | 0.97 ± 0.12 | загиб |
| ZrO ₂ , Кт | 45 | ? | |

мые существованием в литосфере неравновесных систем с развитыми цепями положительной обратной связи. Что касается логнормального закона распределения величин концентраций, то этот результат естественно трактовать как следствие формирования месторождений в результате ряда последовательных эпизодов (стадий) концентрирования рудной компоненты. При этом логнормальный закон реализуется в результате перемножения независимых коэффициентов обогащения на каждом из этих этапов. Отметим, что стадийность процессов формирования крупных месторождений отмечается в обобщающей коллективной монографии [Рундквист и др., 2006] как характерная черта процессов рудогенеза.

В данной работе обсуждаются закономерности распределения числа рудных месторождений от объема запасов для разных видов минерального сырья. Предлагается ряд механизмов реализации выявленного степенного закона распределений числа месторождений от объема запасов и его различий для разных видов сырья. Предположения, вытекающие из предлагаемых механизмов реализации степенного закона, сопоставляются с геолого-геофизическими данными. Полученное соответствие дает основание использовать некоторые из этих предположений в качестве прогнозных признаков развития процессов массивированного рудогенеза.

Использованные данные и эмпирические закономерности

В работе нами были использованы данные ГИС «Крупные и суперкрупные месторождения» ГИС КСКМ [Largest Mineral Deposits..., 2006], на основании которой, с использованием ряда других источников информации, была сформирована база данных (далее БД) по запасам и концентрациям рудных компонент в крупных и суперкрупных месторождениях мира.

Для исследования закона распределения числа месторождений от объема запасов были использованы примеры, более других обеспеченные статистическим материалом, а именно, с числом крупных месторождений с известным объемом запасов не менее 30 штук (Табл. 1). Дополнительно приведены данные по месторождениям алмазов с меньшим объемом данных (24 месторождения) в связи с уникально глубинным источником данного вида минерального сырья.

При представлении данных об объемах запасов в линейных координатах точки, отвечающие крупным и суперкрупным месторождениям, оказываются изолированными. Однако при представлении функции распределения в логарифмических координатах получаемый гра-

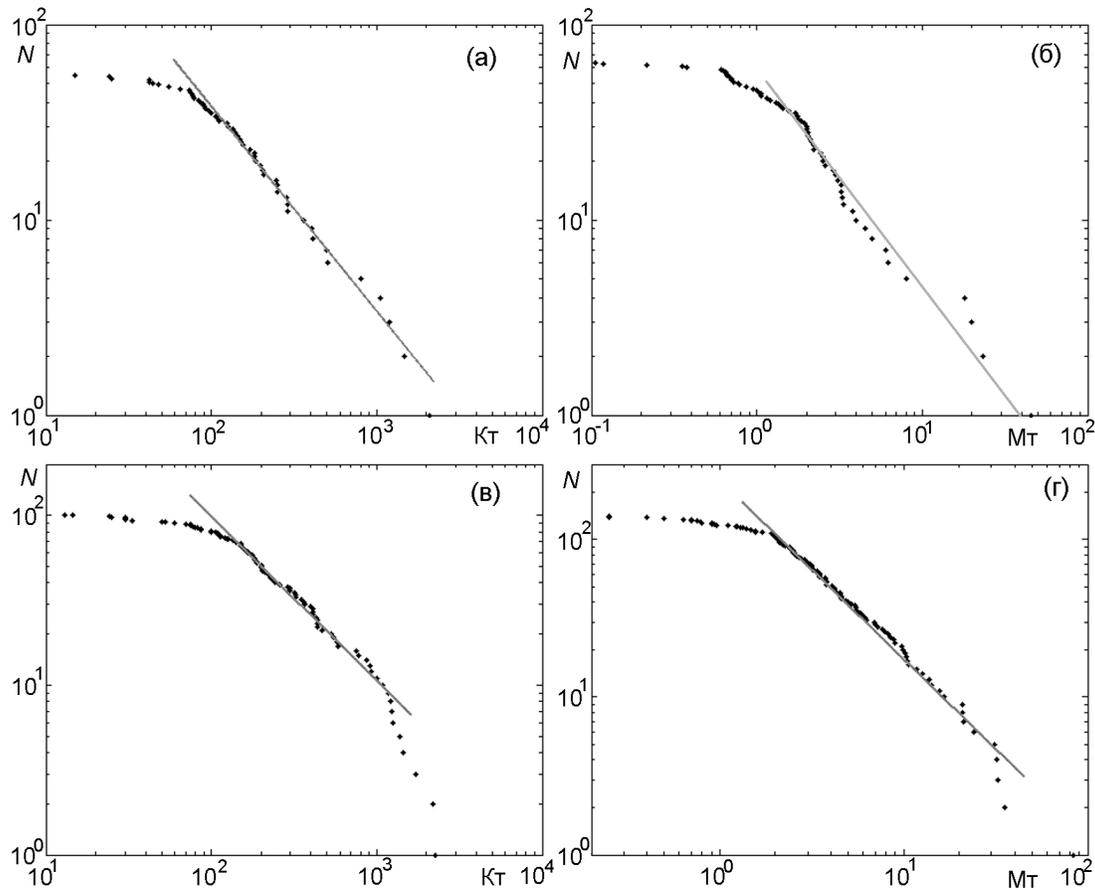


Рис. 1. Эмпирические распределения запасов месторождений кобальта (а), никеля (б), молибдена (в), цинка (г).

фик в области надежно определяемых крупных месторождений оказывается непрерывным и в большинстве случаев практически линейным. Такой характер графиков свидетельствует об однотипности процессов, приводящих к формированию месторождений разного ранга, в том числе и суперкрупных.

Получаемые графики распределения числа месторождений от объема запасов вполне аналогичны известному закону повторяемости землетрясений Г–Р. В области сильных и без пропусков определяемых событий (землетрясений или месторождений) наблюдается линейная зависимость между логарифмом величины события и числом событий, величиной не меньших данного значения. Типичные примеры таких степенных распределений приведены на Рис. 1.

Обсудим полученные графики распределений более подробно. Как уже отмечалось выше, основная часть распределения соответствует степенному закону и в двойных логарифмических координатах отображается прямой линией. Отвечающие этой части распределения значения показателя степени β для различных видов рудного сырья представлены в Табл. 1. В области событий меньшей величины графики распределений резко отклоняются от степенного закона, указывая на сильный дефи-

цит числа слабых событий (как землетрясений, так и месторождений). В случае сейсмичности такое отклонение традиционно объясняется неполной регистрацией слабых землетрясений; аналогичное объяснение используется и при интерпретации данных по числу месторождений углеводородов [Бурштейн, 2006; Конторович и др., 1985]. Но возможно и иное объяснение, связанное с характером обобщенного распределения Парето (ОРП), являющегося предельным распределением теории вероятностей [Писаренко и Родкин, 2007; Mantegna and Stanley, 2000]. ОРП отвечает предельному закону распределения для очень широкого класса условий, по-видимому, отвечающих и случаю формирования месторождений; этот закон распределения аппроксимируется степенным соотношением в области больших и экстремально больших событий, но отвечает существенно меньшему числу относительно более слабых событий. Такой характер поведения ОРП может объяснять относительно меньшее число месторождений с малым объемом запасов [Rodkin et al., 2008]. Более детально этот вопрос здесь не рассматривается.

Для некоторых эмпирических распределений (примеры на Рис. 1 в, г) наблюдается отклонение от степенного закона также и в области редких сильнейших событий. В сейсмологии такое отклонение хорошо известно как

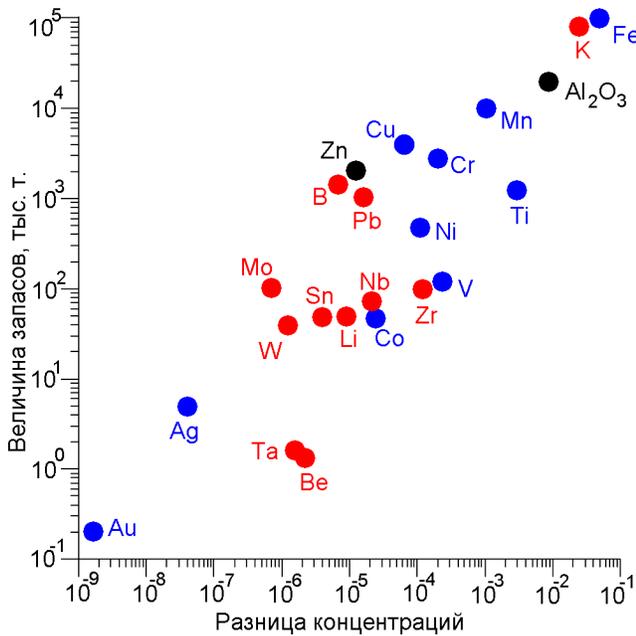


Рис. 2. Тесная связь разницы средних концентраций элементов в верхней и нижней коре с характерными значениями запасов крупных и суперкрупных месторождений (приведен случай крупных месторождений). Красными точками отмечены случаи сильного обогащения в верхней части коры, синие точки отвечают обогащению нижней коры, черные точки – без заметного обогащения.

загиб вниз графика повторяемости Г–Р в области сильнейших землетрясений. Экстремально больших событий оказывается меньше, чем это следует из степенного закона распределения. Такое отклонение объясняется обычно наличием тех или иных ограничений на величину максимально возможного события (в частности, на величину максимально возможного землетрясения или месторождения).

Укажем также важное формально-математическое обоснование отклонений от степенного закона для распределений с малыми значениями показателя степени в области экстремально больших событий. Действительно, в тех случаях, когда значение степени распределения для данного закона распределения оказывается меньшим или равным единице, среднее значения распределения формально оказывается бесконечным. Это означает, что такое распределение не может реально выполняться для сколь угодно больших значений, и что число экстремально больших событий должно быть реально меньшим, чем это следует из закона распределения с показателем степени $\beta \leq 1$. Данные Табл. 1 подтверждают такую закономерность. Явственно выраженный загиб графика распределения вниз в области крупнейших месторождений наблюдается почти исключительно для тех наборов данных, для которых значения показателя степени распределения оказываются меньшими единицы. Исключениями из этой закономерности являются случаи месторождений алмазов и Ti. Такое отклонение можно рассматри-

вать как косвенное указание на то, что используемая БД не отображает адекватно информацию о крупнейших месторождениях по этим видам минерального сырья. Дальнейшее исследование этого практически важного вопроса требует детального анализа исходных данных по этим видам месторождений.

Некоторые модели реализации степенного закона распределения величин запасов месторождений

Реализация степенного закона распределения предполагает выполнение достаточно специфических условий. В работах [Родкин, 2006; Rodkin et al., 2008, и др.], выполненных применительно к УВ месторождениям, рассматривается модель, в значительной степени аналогичная используемой при интерпретации графика повторяемости землетрясений Г–Р [Родкин, 2001]. А именно, предполагается реализация степенного закона распределения в ходе множества случайных по длительности процессов заполнения потенциальных ловушек УВ в режиме (квази)лавинообразного их наполнения. В пользу возможности такого режима формирования УВ месторождений свидетельствуют признаки их современного пополнения, причем скорость такого пополнения в среднем оказывается пропорциональной объему запасов данного месторождения [Муслимов и др., 2004; Родкин, 2006], что и отвечает возникновению необходимой для реализации степенного закона распределения цепи положительной обратной связи.

Для случая рудных месторождений также имеются свидетельства их современного восполнения [Красный и Красный, 2008]. В целом, однако, механизм быстрого (в геологическом смысле) и лавинообразного формирования рудных месторождений не представляется достаточно оправданным; во всяком случае, вряд ли такой механизм может считаться типичным. Ниже рассматривается модель, в которой степенное распределение запасов рудных месторождений формируется на основе логнормального закона распределения, дополненного возникновением относительно слабой цепи положительной обратной связи.

На Рис. 2 представлены значения разности средней концентрации различных рудных компонент в резервуарах верхней и нижней коры (по данным [Тейлор и Мак-Леннан, 1988]) в сопоставлении с характерными значениями величин запасов крупных месторождений разных видов минерального сырья ([Рунджвист и др., 2006], Т. 1, Табл. 1.2). Легко видеть, что между этими характеристиками наблюдается тесная корреляция, причем более тесная, чем если сравнивать объемы месторождений с концентрациями соответствующих компонент в верхней или нижней коре по отдельности. Исходя из этого, можно предположить, что процесс формирования крупных рудных месторождений часто является побочным продуктом преобразования больших объемов земной коры из одного корового резервуара в другой (аналогично, с участием

Табл. 2. Соотношение объемов “освобождаемых” компонент при базификации верхней коры в области глубинных коровых надвигов и максимальных запасов месторождений видов минерального сырья с сильным обогащением в верхней коре

| Компонента | Концентрация в верхней коре | Концентрация в нижней коре | Избыточный объем компоненты | Максимальный объем месторождения |
|-------------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|-------------------------------------|
| Pb | 20 млн ⁻¹ | 4 млн ⁻¹ | 2400 Мт | 27.1 Мт |
| Sn | 5.5 млн ⁻¹ | 1.5 млн ⁻¹ | 600 Мт | 1.5 Мт |
| W(WO ₃) | 2 млн ⁻¹ | 0.7 млн ⁻¹ | 190 Мт | 1.1 Мт |
| Mo | 1.5 млн ⁻¹ | 0.8 млн ⁻¹ | 100 Мт | 1.4 Мт |
| U | 2.8 млн ⁻¹ | 0.28 млн ⁻¹ | 370 Мт | 980 Кт |
| Be(BeO) | 3 млн ⁻¹ | 1 млн ⁻¹ | 300 Мт | 68 Кт |
| Li(Li ₂ O) | 20 млн ⁻¹ | 11 млн ⁻¹ | 1300 Мт | 19.4 Мт |
| Ta(Ta ₂ O ₅) | 2.2 млн ⁻¹ | 0.6 млн ⁻¹ | 240 Мт | 90 Кт |
| Nb(Nb ₂ O ₅) | 25 млн ⁻¹ | 6 млн ⁻¹ | 2850 Мт | 81.4 Мт |

мантийных резервуаров). Физическим механизмом отделения рудных компонент может быть процесс отделения относительно менее совместимых компонент в процессах метаморфических превращений и подплавления горных пород [Урусов и др., 1997; Frank et al., 1989].

Гипотетический максимальный объем запасов месторождения задается в рамках предлагаемой схемы произведением объема подвергшейся преобразованию горной породы на разность средних концентраций рудной компоненты в исходном и конечном резервуарах земной коры. Отметим, что перемножение линейных размеров охваченной преобразованием области создает предпосылки для формирования закона распределения, близкого к логнормальному.

Процесс преобразование вещества земной коры из резервуара типа “верхняя кора” в резервуар “нижняя кора” можно представить реализующимся в ходе развития глубинного надвига. При этом будут отторгаться компоненты верхней коры, избыточные для среднего состава нижней коры. Примем характерную мощность верхней коры 10 км, амплитуду надвига 100 км и протяженность зоны надвига, вещество из которой может собраться в одно месторождение, 50 км. Сопоставляя полученный избыточный объем рудной компоненты с размером запасов крупнейшего месторождения из БД, можно оценить эффективность предполагаемого механизма формирования месторождений. Такая эффективность для разных рудных компонент оказывается порядка одного процента и менее (Табл. 2), что представляется разумной оценкой.

Предполагаемое в рамках предложенной схемы различие процессов формирования месторождений с относительно обогащениями в верхней или нижней коре косвенно подкрепляется данными Табл. 1. Для видов минерального сырья с относительным обогащением в верхней коре характерны, в среднем, меньшие значения показателя степени распределения β (Табл. 1). Отметим также, что тесная связь рудных месторождений с зонами флюидопотоков и глубинных разломов (в особенности, надвигов) убедительно подкрепляется многочисленными геологическими данными [Рундквист и др., 2006; Русинов и

др., 2008; Старостенко и др., 2007, и др.].

Приведенный гипотетический механизм формирования месторождения в области развития глубинного надвига обеспечивает, однако, формирование не степенного, а только логнормального закона распределения, с менее тяжелым хвостом распределения. Для реализации эмпирически наблюдаемого степенного распределения необходим некий дополнительный механизм положительной обратной связи, обеспечивающий преимущественное развитие относительно более крупных месторождений. Такой механизм может порождаться корреляцией линейных размеров преобразуемых объемов земной коры. Применительно к глубинным надвигам такая корреляция отвечает известной эмпирической тенденции, заключающейся в том, что для больших по мощности зон надвига характерны в среднем и большие амплитуды надвиговых движений.

Другой вариант развития необходимой положительной обратной связи связан с моделью формирования рудных месторождений потоками выявленных Д. С. Коржинским трансмагматических флюидов [Зотов, 1989, и др.]. В данном случае положительная обратная связь, обеспечивающая реализацию степенного закона распределения, обуславливается тем, что рудосодержащие трансмагматические флюиды, проходя через застывающую магму, разогревают ее и поддерживают тем самым канал эффективного переноса для новых порций трансмагматических флюидов. Такой механизм формирования месторождений убедительно подкрепляется данными детальными исследованиями по уникальному Норильскому рудоносному узлу.

Заключение

На основе базы данных по крупным и суперкрупным рудным месторождениям проведен анализ эмпирических распределений числа месторождений от объема запасов. Подтвержден степенной характер таких распределений

с показателем степени распределения β , изменяющимся для разных рудных компонент от 0.7 до 1.4. Аналогично известному закону повторяемости землетрясений Гутенберга–Рихтера, для типов месторождений с показателем степени $\beta < 1$ (что отвечает физически нереализуемому случаю бесконечных средних значений) наблюдается дефицит числа суперкрупных месторождений.

Выявлена неизвестная ранее тесная корреляция между характерным объемом месторождений разных видов минерального сырья и разностью средней концентрации соответствующих компонент в верхней и нижней коре. Выявленная закономерность интерпретируется в том смысле, что образование рудных месторождений является побочным продуктом массивованного преобразования вещества литосферы между разными резервуарами: “верхняя кора”, “нижняя кора”, “верхняя мантия”, иные резервуары.

Модель формирования месторождений как побочного продукта переработки блоков литосферы со случайными значениями размеров блоков порождает закон распределения величин запасов месторождений, близкий к логнормальному. Преобразование этого закона распределения в эмпирически наблюдаемый степенной закон распределения предполагает существование также цепи положительной обратной связи, обеспечивающей преимущественное накопление сырья в более крупных месторождениях.

Один из возможных механизмов возникновения такой связи может реализовываться в рамках модели формирования рудных месторождений потоками трансмагматических флюидов, когда рудоносный флюид, распространяясь по медленно застывающей магме, подогревает ее и тем создает предпосылки для улучшения транспортных свойств данного канала распространения флюидов.

Благодарность. Работа подготовлена при финансовой поддержке Проекта 14 Президиума РАН.

Литература

- Бурштейн, Л. М. (2006), Статистические оценки параметров распределения скоплений нефти по величине в слабоизученных седиментационных бассейнах, *Геология и геофизика*, 47(9), 1013–1023.
- Зотов, И. А. (1989), *Трансмагматические флюиды в магматизме и рудообразовании*, Наука, Москва.
- Конторович, А. Э., В. И. Демин, И. А. Страхов (1985), Закономерности выявления различных по запасам месторождений нефти и газа в нефтегазоносных бассейнах, *Геология и геофизика*, 26(11), 3–16.
- Красный, Л. И., М. Л. Красный (2008), Значение возобновляемости минеральных ресурсов в геологии полезных ископаемых, *ДАН РАН*, 418(3), 356–360.
- Муслимов, Р. Х., И. Ф. Глумов, Д. К. Нургалиев (2004), Нефтяные и газовые месторождения – саморазвивающиеся и постоянно возобновляемые объекты, *Геология нефти и газа*, No. 1, 43–49.
- Писаренко, В. Ф., М. В. Родкин (2007), Распределения с тяжелыми хвостами: приложения к анализу катастроф, *В: Вычислительная сейсмология*, Вып. 38, 240, ГЕОС, Москва.
- Родкин, М. В. (2001), Кумулятивный и мультипликативный каскады как модели типизации и механизмов развития катастроф, *Геозкология*, No. 4, 320–328.
- Родкин, М. В. (2006), Степенное распределение запасов УВ в месторождениях: модели генерации и связь с процессами восполнения запасов в разрабатываемых месторождениях, *Генезис углеводородных флюидов и месторождений*, 84–92, ГЕОС, Москва.
- Родкин, М. В. (2007), Модель образования гигантских месторождений по механизму положительной обратной связи, *Синергетика геосистем*, 67–72, Московское отделение Российского минералогического общества, Москва.
- Рундквист, Д. В., А. В. Ткачев, С. В. Черкасов (2006), *Крупные и суперкрупные месторождения рудных полезных ископаемых, в 3 томах*, ИГЕМ РАН, Москва.
- Русинов, В. Л., О. В. Русинова, С. Г. Кряжев, Ю. В. Щегольков, Э. И. Алышева, С. Е. Борисовский (2008), Околорудный метасоматизм терригенных углеродистых пород в Ленском золоторудном районе, *Геология рудных месторождений*, 50(1), 3–46.
- Старостенко, В. И., О. Б. Гинтов, И. К. Пашкевич, Т. К. Бурахович, С. Н. Кулик, П. Я. Куприенко, Р. И. Кутас, И. Б. Макаренко, М. И. Орлюк, Т. А. Цветкова (2007), Металлогения Украинского щита: закономерности размещения месторождений рудных полезных ископаемых, связь с глубинным строением и динамикой литосферы, *Геофизический журнал*, 29(6), 3–31.
- Тейлор, С. Р., С. М. Мак-Леннан (1988), *Континентальная кора, ее состав и эволюция*, Мир, Москва.
- Урусов, В. С., В. Л. Таусон, В. В. Акимов (1997), *Геохимия твердого тела*, ГЕОС, Москва.
- Frank, S., H. Stiller, W. Seifert (1989), Effects of high temperature phase transitions on chemical differentiation, *High Pressure Investigations in Geosciences*, 194–203, Akademie-Verlag, Berlin.
- Mantegna, R. N., H. E. Stanley (2000), *An Introduction to Econophysics. Correlations and Complexity in Finance*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Rodkin, M. V., A. D. Gvishiani, L. M. Labuntsova (2008), 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*, 10(5),
- Tutcliffe, D. L. (1997), *Fractals and chaos in geology and geophysics*, Cambridge University Press, Cambridge.
- М. В. Родкин, МИТП РАН, ул. Профсоюзная 84/32, Москва, Россия. (rodkin@wdcb.ru)
- Е. М. Граева, Л. М. Лабунцова и А. Р. Шатахян, Геофизический центр РАН, ул. Молодежная 3, 119296 Москва, Россия. (e.graeva@gcras.ru)
- И. А. Зотов, Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН (ИГЕМ РАН), Старомонетный пер. 35, 119017 Москва, Россия. (olimpus16@yandex.ru)