



ШАТАХЦЯН Артем Рубенович

**СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ И КЛАСТЕРИЗАЦИЯ РУДНЫХ
МЕСТОРОЖДЕНИЙ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕР БЛИЗОСТИ И
ФРАКТАЛЬНЫХ РАЗМЕРНОСТЕЙ**

25.00.10 – Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Геофизическом центре Российской академии наук (ГЦ РАН).

- Научный руководитель: Родкин Михаил Владимирович, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики Российской академии наук, г. Москва, главный научный сотрудник.
- Официальные оппоненты: Любушин Алексей Александрович, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли им. О.Ю.Шмидта Российской академии наук, г. Москва, заведующий лабораторией.
Салтыков Вадим Александрович, доктор физико-математических наук, Камчатский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра "Единая геофизическая служба Российской академии наук", г. Петропавловск-Камчатский, заведующий лабораторией, доцент.
- Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», г. Москва.

Защита состоится «03» октября 2017 г. в 10-00 часов на заседании диссертационного совета Д999.004.03 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИМГиГ ДВО РАН), Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте вулканологии и сейсмологии Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИВиС ДВО РАН), Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте космофизических исследований и распространения радиоволн Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИКИР ДВО РАН) по адресу: 684034, Камчатский край, Елизовский район, п. Паратунка, ул. Мирная, д. 7.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеках ИМГиГ ДВО РАН, ИВиС ДВО РАН, ИКИР ДВО РАН и на сайте www.imgg.ru. Автореферат размещен на официальном сайте Высшей аттестационной комиссии при Министерстве образования и науки Российской Федерации <http://vak.ed.gov.ru/> и на сайте www.imgg.ru.

Отзывы на автореферат, заверенные печатью, в 2-х экземплярах направлять по адресу: 693022, г. Южно-Сахалинск, ул. Науки, 1Б. Тел/факс 8 (4242) 791-517, E-mail: m.andreeva@imgg.ru, ученому секретарю диссертационного совета Марине Юрьевне Андреевой.

Автореферат разослан _____ 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д999.004.03
кандидат физико-математических наук



М.Ю.Андреева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследований

Установлено широкое распространение в природе степенных законов распределения и фрактальности пространственной и временной структуры большого числа природных процессов и систем. Для исследования таких систем нашли применение и были специально разработаны методы фрактального анализа и иные подходы, которые показали свою эффективность при анализе сейсмичности, структуры разломной и гидрографической сети, месторождений углеводородов (УВ) и многих других природных геофизических объектов и явлений. Наблюдается тенденция расширения сферы применения этих новых подходов на другие природные объекты и явления. К таким весьма практически важным областям относится область исследования рудных месторождений. На настоящий момент остаются неясными многие важные проблемы рудогенеза, в частности, принципиально важный вопрос – каков источник энергии и характер тех мощных негэнтропийных процессов, что приводят к массивированной и чрезвычайно высокой (относительно фонового содержания) концентрации рудного вещества в месторождениях. Применение методов исследований, нацеленных на анализ неравновесных динамических систем, позволяет продвинуться в решении эти вопросов. Отсюда следует актуальность проведенного исследования.

Следует отметить также, что расширение применения методов на новую проблемную область зачастую приводит к необходимости развития также формально-математического аппарата и методов исследования. Именно такой случай имеет место и в настоящем исследовании. При исследовании статистических закономерностей взаимного расположения рудных месторождений разного типа оказалось продуктивным ввести понятие смешанной фрактальной размерности. Отсюда следует актуальность настоящего исследования также и в методологическом отношении.

Основные цели настоящего исследования:

- Получение опыта применения формально-математических методов (статистический и фрактальный анализ, кластеризация и другие) к анализу данных по рудным месторождениям. Развитие этих подходов, учитывая специфический характер этой проблемной области.
- Исследование законов распределения, типичных для данных по рудным месторождениям (по данным географической информационной системы «Крупные и Суперкрупные Месторождения» (ГИС КСКМ) и других источников), кластеризация типов рудных месторождений на основе использования мер близости и фрактального анализа.

Задачи исследования

1. Компиляция базы данных на основе ГИС КСКМ и других источников, пополнение базы более детальными данными по месторождениям меди.
2. Статистический анализ сформированной сводной БД в виде матрицы значений исследуемых параметров на основе данных ГИС КСКМ и других источников, исследование возможных аппроксимаций эмпирических распределений величин запасов и концентраций крупных и суперкрупных рудных месторождений; подтверждение ранее высказанной (на основе существенно менее представительных массивов данных) гипотезы о возможности описания эмпирических

распределений величин запасов – степенным, а значений концентрации – логнормальным законами распределения.

3. Развитие методов фрактального корреляционного анализа применительно к исследованию рудных месторождений; введение нового понятия – смешанной корреляционной размерности.

4. Апробирование возможности применения для кластеризации рудных месторождений подхода, основанного на применении меры близости Танимото-Роджерса (Т-Р) и смешанной корреляционной размерности.

5. Оценка согласованности результатов расчетов степени близости разных видов месторождений на основе применения смешанной корреляционной фрактальной размерности и меры близости Т-Р.

6. Разработка обеспечивающих реализацию выявленных статистических закономерностей общих формально-математических моделей формирования рудных месторождений и некоторых возможных, отвечающих им геологических моделей формирования месторождений.

Фактический материал и методика исследований

Информационную основу (фактический материал) исследований составляли мировые базы данных по рудным месторождениям: ГИС КСКМ, по седиментационным, магматическим и порфирировым медным месторождениям. Извлечение данных из ГИС КСКМ и пополнение базы данных проводилось с помощью стандартных программ обработки данных, обработка сформированной базы данных (БД) проводилась средствами пакета MatLab.

Методика исследования заключалась в применении методов динамического (фрактального) анализа ранее разработанных применительно к сейсмологии и ряда других статистических подходов для исследования данных по крупным и суперкрупным рудным месторождениям.

Научная новизна работы и практическая значимость

Научная новизна состоит в применении методов статистического, кластерного и фрактального анализа к массивам данных по крупным рудным месторождениям (ряд использованных подходов ранее не применялся или применялся только в других областях знаний) и в построении генерализованных моделей формирования месторождений, обеспечивающих выполнение выявленных статистических закономерностей.

Практическая значимость заключается в выявлении ряда неизвестных ранее статистических закономерностей в характере данных по расположению, набору полезных элементов, объемам запасов и концентраций руд в крупных и суперкрупных месторождениях.

Личный вклад автора

В ходе работы автор проделал основной объем работ по подготовке, дополнению и верификации используемой в диссертации базы данных, принимал непосредственное участие в обсуждении большинства использованных методов анализа данных и в их реализации, а также в подготовке к публикации совместных статей. Автор является основным разработчиком приемов визуального представления данных по изменению фрактальной размерности с изменением масштаба расстояний между объектами. Непосредственно автором получены и обработаны более детальные данные по совокупности мировых порфирировых, магматических и седиментационных

месторождений меди, также им персонально разработаны некоторые методические вопросы по реализации кластеризации данных и по представлению фрактальных размерностей.

Защищаемые положения:

1. Подтверждено, что данные по величинам запасов и значениям концентрации крупных рудных месторождений мира могут быть описаны степенным и логнормальным законами соответственно.
2. Показана применимость и эффективность методов анализа поведения динамических систем для анализа данных по рудным месторождениям. Для анализа данных по месторождениям аппарат фрактального анализа дополнен введением понятия смешанной корреляционной фрактальной размерности и ее интерпретацией в терминах меры близости.
3. Показана применимость и эффективность формального аппарата кластеризации на основе меры близости T-P и смешанной корреляционной размерности к данным по рудным месторождениям, согласованность и информативность применения этих разных методов кластеризации.

Достоверность и обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций обеспечивается корректным использованием методов математического моделирования, теории вероятности и математической статистики, апробированными фактическими данными географической информационной системы «Крупные и Суперкрупные Месторождения» и других использованных источников, достаточным объемом таких данных, согласованностью полученных результатов с результатами, полученными ранее другими авторами и другими методами.

Теоретическое и практическое значение

Развиты новые подходы к описанию данных по крупным и суперкрупным рудным месторождениям и выявлен ряд неизвестных ранее статистических закономерностей в характере данных по расположению, набору полезных элементов, объемам запасов и концентраций руд в крупных и суперкрупных месторождениях мира.

Получены новые свидетельства, что формирование рудных месторождений является результатом действия геодинамических неравновесных систем.

В уточнение и дополнение к ранее предложенным экспертным качественным моделям кластеризации рудных месторождений предложены два согласующихся формально-математических метода кластеризации.

Апробация работы

Основные результаты, полученные в ходе настоящей работы, были представлены на пятнадцать всероссийских, международных научных конференциях и совещаниях:

Международной конференции «Итоги электронного геофизического года» (Переславль-Залеский, 2009); Всероссийской конференции «Новые горизонты в изучении процессов магмо- и рудообразования» (Москва, 2010); XLIII Тектоническом совещании «Тектоника и геодинамика складчатых поясов и платформ фанерозоя» (Москва, 2010); XVI Международной конференции «Свойства, структура, динамика и минерагения литосферы Восточно-Европейской платформы»

(Воронеж, 2010); Interdisciplinary Workshop «The earth expansion evidence – A Challenge for Geology, Geophysics and Astronomy» (Erice, Sicily, Italy, 2011); Третьей научно-практической конференции молодых ученых и специалистов «Комплексное изучение и оценка месторождений твердых полезных ископаемых» (Москва, 2011); Всероссийской научной конференции «Тектоника, рудные месторождения и глубинное строение Земной коры» (Екатеринбург, 2011); 11-м Всероссийском семинаре «Геодинамика, геомеханика и геофизика» (п. Новый Энхалук, Республика Бурятия, 2011); Всероссийской научной конференции с международным участием «Геодинамические процессы и природные катастрофы в Дальневосточном регионе» (Южно-Сахалинск, 2011); Всероссийской научной конференции с международным участием «Геодинамика, рудные месторождения и глубинное строение литосферы» (Екатеринбург, 2012); 28-й Международной конференции «Геологическая среда, минерагенические и сейсмотектонические процессы» (Воронеж, 2012); Всероссийской конференции «Тектоника, глубинное строение и минерагения Востока Азии» (Хабаровск, 2013); XIV международной конференции «Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле» (Борок, 2013); XLVI Тектоническом совещании «Тектоника складчатых поясов Евразии» (Москва, 2014); XLIX Тектоническом совещании «Тектоника современных и древних океанов и их окраин» (Москва, 2017).

Результаты работ подробно докладывались автором на специализированных семинарах Геофизического центра Российской академии наук, Института теории прогноза землетрясений Российской академии наук, Геологического музея Российской академии наук и геологического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова.

Публикации

По теме диссертационной работы подготовлена 21 публикация, из них 4 – в российских и зарубежных научных изданиях, входящих в перечень ВАК РФ для публикации основных результатов кандидатских диссертаций.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и списка литературы из 88 наименований. Объем диссертации – 114 страниц текста, 42 рисунка и 9 таблиц.

Благодарности

Автор благодарен сотрудникам ГЦ РАН, где проводилась работа по подготовке диссертации. В особенности автор признателен своему руководителю – д.ф.-м.н. М.В. Родкину за руководство в работе, директору ГЦ РАН академику А.Д. Гвишиани за указание общего направления исследований по применению методов искусственного интеллекта и кластеризации к новым областям геофизики и геологии, С.М. Агаяну и Ш.Р. Богоутдинову – за обсуждение отдельных вопросов по теме диссертации, а также Е.М. Граевой за участие в подготовке базы данных по крупным и суперкрупным месторождениям, которая и легла в основу диссертации. Автор также признателен д.г.-м.н. А.В. Ткачеву (ГГМ РАН, Москва) за предоставление базы данных по медным месторождениям, академику Д.В. Рундквисту, чл.-корр. РАН, директору ИФЗ РАН С.А. Тихоцкому, д.ф.-м.н. А.И. Горшкову (ИТПЗ РАН) и д.г.-м.н. К.С. Иванову (ИГиГ УрО РАН) за интерес к работе и ценные рецензии представленных к публикации статей, что позволило

глубже проинтерпретировать ряд полученных в работе формально-математических статистических соотношений и закономерностей.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** раскрывается актуальность применения методов статистического и фрактального анализа и кластеризации в геологии. Аргументируется эффективность таких методов исследования при изучении динамических систем различной физической природы. Делается вывод, что одной из областей, где можно ожидать эффективности применения таких методов, является область исследования рудных месторождений.

Применения этих новых методов возможно при наличии достаточно полных и представительных баз данных, обеспечивающих возможность получения достоверных статистических результатов. Такие базы данных недавно появились и для рудных месторождений. Настоящая работа в значительной мере построена на использовании ГИС КСКМ по крупным и суперкрупным рудным месторождениям мира.

В первой главе исследуются эмпирические распределения величин запасов и концентраций руд в крупных и суперкрупных месторождениях мира.

Характер закона распределения числа объектов в зависимости от их величины играет важную роль во многих областях науки. Общеизвестна огромная роль закона повторяемости землетрясений Гутенберга-Рихтера в сейсмологии. Позднее в [Mandelbrot, 1982] было показано, что фрактальные структуры и описывающие их степенные законы распределения распространены в природе очень широко. В частности, было высказано предположение, что степенное соотношение описывает распределения величин запасов месторождений. Для углеводородных месторождений степенное распределение числа месторождений от величины запасов уже установлено и даже используется для прогноза ожидаемого числа еще не открытых месторождений разного ранга [Конторович, 1979; 1985; Бурштейн, 2006]. В рудной геологии характер распределения числа месторождений от объема запасов оставался дискуссионным.

Для исследования характера распределения величин запасов и концентраций была использована база данных по рудным месторождениям мира. На основании анализа этой базы данных (скомпилированной на основе ГИС КСКМ и иных источников) было показано, что для месторождений различных видов сырья наблюдается довольно единообразный характер распределения, а именно, распределение величин запасов может быть описано степенным законом распределения, а распределение величин концентрации может быть аппроксимировано логнормальным законом распределения. Применимость такой аппроксимации для разных видов руд проверялась на основе статистических критериев и в подавляющем большинстве случаев было получено приемлемое согласие. При этом, хотя значения показателя степенного закона для разных руд различаются, они близки к типичному для природных систем значению, близкому к единице (Рисунок 1 и Таблица 1).

Со времени создания теории фракталов [Mandelbrot, 1982] выполнимость степенного закона распределения принято рассматривать как важное и решающее указание на фрактальный характер структуры рассматриваемого явления и на существенно неравновесный характер процессов, порождающих это явление. Отсюда следует перспективность анализа данных по рудным

месторождениям методами исследования динамических (по терминологии Пригожина) систем - методами фрактального анализа и иными методами, традиционно используемыми при исследовании динамических систем. Результаты такого применения описаны ниже.

В пользу динамического характера формирующих рудные месторождения геосистем указывают и типичность положительной корреляции между суммарными запасами рудных месторождений и величинами концентрации (последний столбец таблицы). Увеличение объемов запасов как бы сопровождается также и дополнительной переработкой, обогащением рудного вещества. Возможная геологическая модель такого процесса предложена в последней (четвертой) главе диссертации.

В плане аналогии сейсмических данных и данных по объема месторождениям отметим часто наблюдаемую для рудных месторождений тенденцию «загиба вниз» эмпирического закона распределения величин запасов для нескольких крупнейших месторождений. Аналогичная тенденция известна в сейсмологии. Такое поведение особенно типично для рудных месторождений для которых показатель степени распределения $b \leq 1$ и где «загиб графика вниз» отвечает конечности теоретического объема запасов .

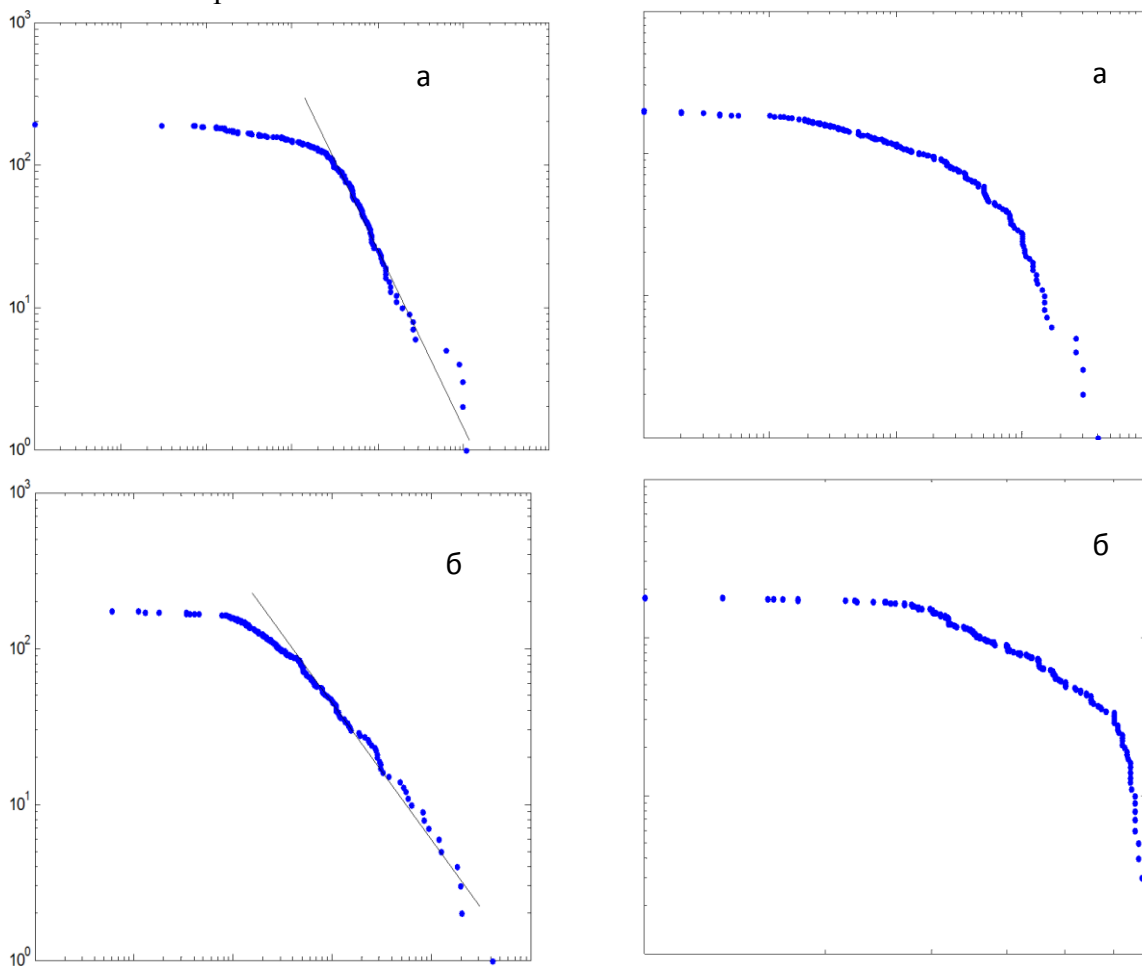


Рисунок 1 – Примеры типичных распределений величин запасов и концентраций рудных месторождений: а - Cu, б - Fe, слева - объемы запасов (а, – тонны, б – мегатонны), дана аппроксимирующая прямая степенного распределения; справа – концентрации, %. По оси ординат дано количество месторождений, N

Во второй главе обсуждается метод расчета величин корреляционной фрактальной размерности и результаты его применения для анализа пространственного расположения рудных месторождений. Распространение этого метода на иную (и более сложную) предметную область обусловило необходимость определенного развития, ставшего уже классическим метода корреляционного фрактального анализа.

Таблица 1 – Примеры статистических характеристик распределения величин запасов

Вещество	Число месторождений в базе данных	Параметр b степенного распределения величин запасов	Коэффициенты корреляции величин запасов и концентраций
Ag	192	1.31±0.12	0.45
Au	200	1.27±0.14	0.38
Co	56	1.05±0.19	0.11
Cu	212	1.23±0.17	0.40
Ni	73	1.03±0.18	0.37
Fe	178	0.82±0.15	0.15
TiO ₂	37	0.92±0.17	-0.16
Pb	135	1.2±0.15	0.49
Ta ₂ O ₅	46	0.9±0.25	0.06
U	82	0.97±0.20	0.08
WO ₃	57	1.1±0.17	0.25
Mo	105	1.13±0.25	0.28
ZrO ₂	45	1.4±0.5	0.16
алмазы	24	0.85±0.25	0.11
Zn	139	1.1±0.11	0.43
P ₂ O ₅	80	1.0±0.4	0.31
Редкие земли	36	0.45±0.11	-0.14

В сейсмологии характер распределения очагов землетрясений (эпицентры или гипоцентры) рассматривается в достаточно узком диапазоне масштабов. При исследовании же характера размещения крупных и суперкрупных месторождений представляет интерес сопоставление их расположения в очень широком диапазоне масштабов – от масштаба рудного узла (~ 10 км) до масштаба тектонических плит (~ 10³ - 10⁴ км). Другое отличие состоит в том, что очаги землетрясений являются объектами одного типа, а при исследовании месторождений представляет интерес сопоставление характера размещения объектов разного вида – например, месторождений золота и серебра.

По этой причине, реализованный в диссертации подход отличается от используемого в сейсмологии в двух аспектах. Во-первых, демонстрируется целесообразность получения разных величин корреляционной размерности на разных пространственных масштабах. Такое разделение оказалось полезным в плане различения закономерностей расположения месторождений в масштабе рудного узла, рудной провинции, ... континента. Во-вторых, вводится и используется новое понятие смешанной корреляционной размерности для объектов разного вида (например, для месторождений Au и Ag, Zn и Pb).

Поясним расширение понятия корреляционной размерности на случай разных масштабов и на случай объектов двух типов. Используем известный метод корреляционной фрактальной размерности, удобный для статистического анализа характера расположения точечных объектов. При реализации этого подхода рассчитывается число пар $N(r)$ объектов (точек, очагов землетрясений, месторождений), расположенных на расстоянии не более r друг от друга, и в двойных логарифмических координатах строится график зависимости $N(r)$ от r . Затем, при наличии прямолинейного участка графика определяется наклон β

$$N(r) \approx r^\beta. \quad (1)$$

Величина β и характеризует корреляционную фрактальную (дробную) размерность размещения исследуемых объектов.

Отличие подхода, используемого ниже, от стандартного состоит в том, что при построении зависимости (1) в широком диапазоне масштабов взаимного расстояния между объектами r может наблюдаться несколько субпрямолинейных участков графика, с разным наклоном в разных диапазонах масштабов. В работе рассматривались общие для разных видов рудного сырья тенденции изменения величин коэффициента β (корреляционной размерности размещения объектов D) в широком диапазоне масштабов – от первых километров до тысяч километров. Данный подход поясняется на модельных примерах, иллюстрирующих возможность получения разных значений корреляционной размерности D в разных диапазонах масштабов. Простой наглядный модельный пример приведен на рисунке 2. На рисунке 2а представлена модельная ситуация, когда точки (месторождения) приурочены к коротким случайным образом распределенным по плоскости отрезкам (скажем, к участкам разломных зон). Отсюда на малых масштабах, отвечающих размеру характерной «разломной зоны», размерность размещения месторождений D отвечает их приуроченности к линейным зонам, то есть равна единице. На больших масштабах, отвечающих взаимному распределению отдельных разломных зон, размерность D описывает равномерное распределение таких разломных зон по площади, то есть параметр D принимает значение равное 2. На рисунке 2а характерные размеры разломных зон и расстояния между этими зонами приняты нарочито сильно различающимися. Отсюда на рисунке 2б прямолинейные участки, отвечающие величинам размерности $D=1$ и $D=2$, оказались сильно разнесенными и четко видимыми. Для эмпирических распределений переходы, естественно, не столь резки и не столь определены.

Применительно к случаю распределения месторождений по поверхности Земли расчеты были реализованы с учетом сферичности Земли, что становится существенным при рассмотрении масштабов тысяч и десятков тысяч километров. Под расстоянием между двумя месторождениями понималось минимальное расстояние по дуге большого круга, проходящей через эти месторождения. В целом, для месторождений различных видов рудного сырья наблюдается довольно единообразный характер изменения величин корреляционной размерности D на разных пространственных масштабах. Значения D растут с пространственным масштабом от величин менее единицы до близких к двум. Такие значения указывают на высокую степень кластеризации крупных рудных месторождений. Расстояния между ближайшими крупными месторождениями данного вида систематически намного меньше, чем в случае их случайного расположения по площади. На масштабе от 100 и до 1000 км в характере локализации крупных и суперкрупных рудных месторождений доминирует их приуроченность к линейным структурам (предположительно, активным границам плит и террейнов). На масштабе от несколько тысяч до

десятков тысяч километров размерность расположения месторождений приближается к двум (равномерное по площади). Такая тенденция может отвечать случайной пристыковке друг к другу различных террейнов. На еще больших масштабах уменьшение значений размерности определяется локализацией месторождений на континентах и их отсутствием на акваториях. Близкие и хорошо взаимно согласующиеся данные были получены при аналогичной обработке более детальных данных по месторождениям меди различного генезиса (порфировым, седиментационным, магматическим).

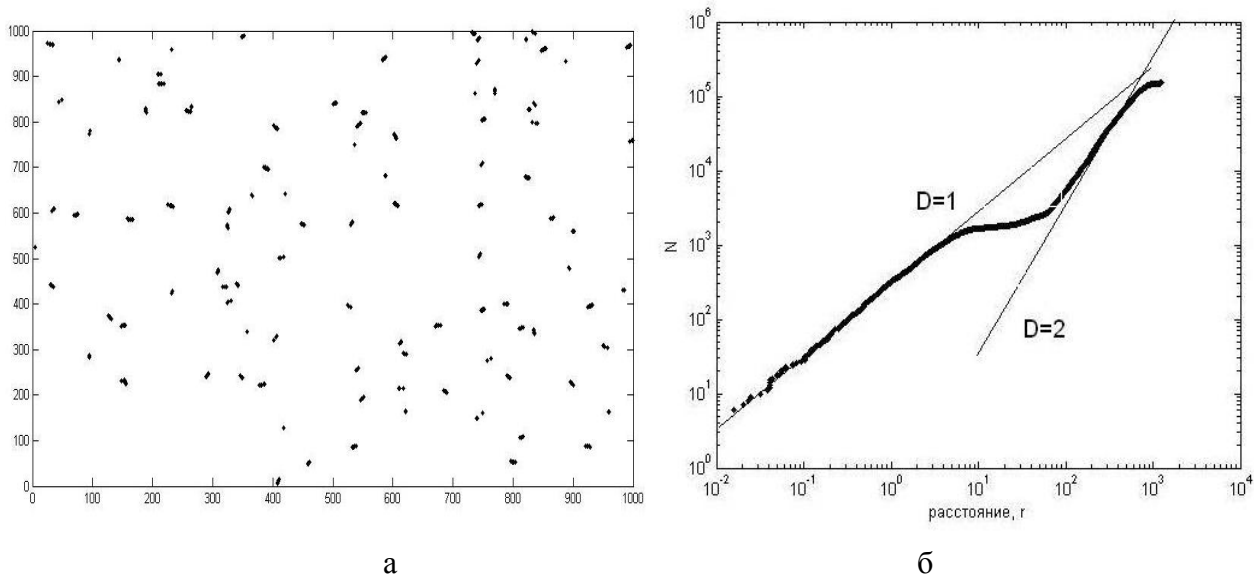
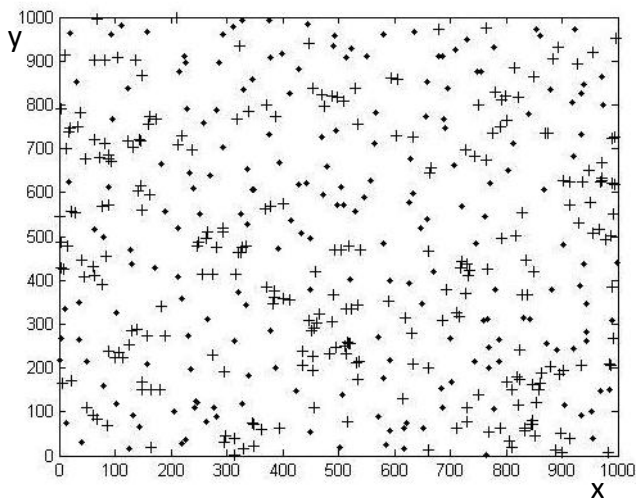


Рисунок 2 – Модельное распределение скоплений точек на плоскости (а) с условной координатной сеткой x - y и соответствующий кумулятивный график для определения корреляционной фрактальной размерности (б). Линиями на (б) показаны характерные значения наклона, соответствующие корреляционным размерностям $D=1$ и $D=2$ для малых и больших значений взаимных расстояний r

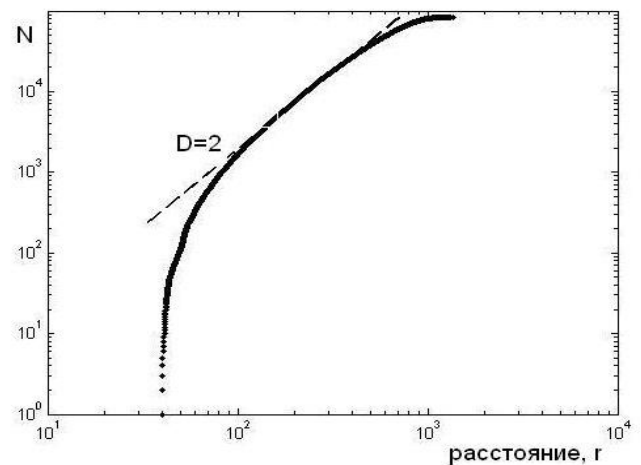
Вторая специфика расчета корреляционной фрактальной размерности в случае месторождений связана с необходимостью описывать взаимное расположение объектов разного типа. Обобщение метода расчета корреляционной размерности D на случай месторождений двух типов состоит в том, что в формуле (1) рассматриваются значения числа пар расстояний $N(r_{ij})$ между каждым из объектов $i=1, 2, \dots, N_1$ первого типа со всеми объектами $j=1, 2, \dots, N_2$ второго, где N_1 и N_2 – число объектов первого и второго типа. Значения корреляционной размерности при этом характеризуют взаимное расположение месторождений этих двух типов. Расширение корректно; при нем сохраняются все формальные требования, в частности, симметричность: $D(A,B) = D(B,A)$. Будем называть такие корреляционные размерности $D(A,B)$ смешанными.

При размещении объектов по поверхности (месторождения, эпицентры землетрясений) размерность вмещающего пространства равна двум; при размещении в пространстве (гипоцентры землетрясений) размерность вмещающего пространства равна трем. Расчеты величин смешанной корреляционной размерности сразу выявили случаи, когда величины размерности D в некотором диапазоне масштабов оказались больше размерности вмещающего пространства. Такого не наблюдалось ранее при расчетах D в сейсмологии. Корреляционная размерность пространственного расположения очагов землетрясений всегда оказывалась не более размерности вмещающего пространства. В диссертации возможность такого нового типа поведения

иллюстрируется модельным примером (Рисунок 3). Пусть месторождения типа А распределены по плоскости равномерно. Точки типа В сначала также расположим по площади случайно и равномерно, а затем исключим часть точек В, причем вероятность исключения будет нарастать от 0.05 до 0.95 с уменьшением расстояния от данной точки В до ближайшей к ней точки А. Пример получаемого при этом пространственного распределения дан на рисунке 3а. Рассчитав для такой конфигурации значения $D(A,B)$ (Рисунок 3б), получим, что в некотором интервале масштабов (примерно до 100 условных единиц расстояния) значение размерности существенно размерности вмещающего пространства (=2). Действительно, легко представить, что для взаимно отталкивающихся объектов по поверхности суммарное число пар элементов двух классов будет расти с ростом их взаимного расстояния r быстрее, чем площадь круга πr^2 . Естественно, такое поведение будет наблюдаться только в определенном ограниченном с обеих сторон диапазоне масштабов (величин взаимного расстояния r).



а



б

Рисунок 3 – Пример модельного распределения скопления точек двух видов (точки и крестики) с взаимным отталкиванием на плоскости (а) на условной координатной сетке x-y и соответствующий кумулятивный график для определения корреляционной фрактальной размерности (б). Пунктирная линия на (б) – характерный наклон $D=2$

Из модельного примера видно, что случаи корреляционной размерности большие двух следует интерпретировать как отвечающие «взаимному отталкиванию» месторождений данных двух видов. Аналогично, случаи малой корреляционной размерности можно трактовать как отвечающие тенденции «взаимного притягивания» соответствующих месторождений. Отсюда следует, что метод расчета смешанной корреляционной размерности характеризует тенденции взаимного концентрирования (или взаимного отталкивания) месторождений двух данных видов в данном диапазоне масштабов. То есть, значение корреляционной размерности характеризуют меру взаимной близости месторождений данных типов. Отсюда следует, что значения смешанной корреляционной размерности D_{ij} могут использоваться как характеристики условного расстояния между группами объектов и могут использоваться для их формальной кластеризации.

Естественно, что для случая реальных данных по месторождениям выявленные взаимосвязи будут проявляться менее определенно, и их интерпретация будет менее однозначной, чем для специально построенных модельных примеров.

Для случая месторождений разного вида режимы взаимного притяжения и взаимного отталкивания находят естественную интерпретацию как степень близости геотектонических условий для формирования таких месторождений. Если для данных двух типов месторождений условия их формирования близки, то эти месторождения будут «взаимно притягиваться». Если же условия их формирования резко различны, то месторождения будут как бы отталкиваться.

В третьей главе проводится формальная кластеризация рудных месторождений. Известен ряд схем кластеризации (классификации) месторождений в зависимости от набора рудных компонент и других характеристик. Нами обсуждаются формальные способы кластеризации рудных месторождений на основе меры близости Т-Р. Степень близости разных видов руд естественно характеризовать тем, насколько часто данные рудные компоненты встречаются в одних и тех же месторождениях. В качестве количественной меры такой близости примем меру близости Т-Р, T [Мандель, 1988], обычно определяемую как

$$T(A,B) = (A \cap B) / (A \cup B), \quad (2)$$

где $(A \cap B)$ – число случаев пересечения признаков A и B (число случаев сонахождения руд A и B в одном и том же месторождении); $(A \cup B)$ – объединение множеств A и B (число месторождений компонентов A и B без повторов). Если компонент A всегда сопутствует компоненту B , имеем $T(A,B) = 1$. Если компоненты A и B вместе не встречаются, $T(A,B) = 0$.

Оценки меры близости месторождений разного типа использованы для проведения формальной кластеризации месторождений. Для проведения кластеризации введем условное расстояние R между разными типами месторождений как $R=(1-T)^2$. Такое преобразование вполне допустимо. Для кластеризации месторождений по величинам расстояний R между месторождениями разного типа была использована программа расчета и представления результатов кластеризации пакета MatLab dendrogram. На каждом этапе программа выбирает минимальное расстояние между оставшимися типами месторождений и ранее сформированными кластерами и производит соответствующее присоединение. На выходе программа строит граф, отображающий ход кластеризации (см., рисунок 4).

Большинство формально полученных выводов о степени близости месторождений разных видов рудного сырья и о составе кластеров отвечают известным закономерностям и вполне ожидаемы. Так на первых этапах кластеризации возникли три кластера, объединяющие Pb-Zn-Ag, Au-Cu и Co-Ni месторождения. С увеличением значений R первые два из них объединились в один. Известно, что эти виды рудного сырья часто встречаются совместно, и их объединение в кластер ожидаемо. Ожидаемо также, что специфический наиболее глубоинный вид сырья – алмазы – кластеризуется отдельно. Объединение всей совокупности видов месторождений в единый кластер происходит, когда месторождения алмаза объединяются со всеми другими, что имеет место при значении расстояния Танимото $R=0.998$. Из ожидаемости результатов полученной формальной кластеризации можно заключить об адекватности использованного метода.

Некоторые результаты кластеризации являются новыми. К таким относится частое выделение кластеров, состоящих исключительно (или преимущественно) из элементов с обогащением или в верхней, или в нижней континентальной коре (за типовые составы верхней и

нижней континентальной коры приняты данные [Тейлор, 1988]). В последней главе обсуждается возможная интерпретация этого результата.

В четвертой главе показана хорошая согласованность результатов оценки степени близости разных групп месторождений на основе расчетов величин смешанной корреляционной размерности и при использовании меры близости Т-Р. Также приводится вариант интерпретации некоторых полученных результатов.

Мера близости Т-Р отражает, как часто данные рудные компоненты встречаются совместно. Величина смешанной корреляционной размерности характеризует, имеют ли месторождения двух типов (на малых взаимных расстояниях) тенденцию к взаимному притяжению или к отталкиванию. Наборы данных и методы оценки степени близости в этих двух случаях совершенно различны, но их смысл подобен и отражает степень условной близости месторождений двух данных видов рудного сырья. На рисунке 5 представлено соотношение величин меры близости Т-Р и смешанной корреляционной размерности для наиболее статистически обеспеченных видов рудного сырья.

Видно, что между двумя оценками степени близости наблюдается тесная связь – большим значениям меры близости Т-Р отвечают малые значения смешанной корреляционной размерности (случай «притяжения» двух типов месторождений) и наоборот. Наличие такой тесной корреляции убедительно указывает на согласованность использованных подходов.

Коснемся вопроса возможной интерпретации некоторых результатов нашего анализа. В работе [Родкин, 2013] была выявлена неожиданно высокая корреляция между различием концентраций рудных элементов в среднем составе верхней и нижней континентальной коры (по данным [Тейлор, 1988]) и типичным объемом запасов соответствующих рудных месторождений (по данным [Largest mineral deposits..., 2006]). Этот результат был неожиданным. Известно, что вещество с более высоким содержанием в земной коре формирует и большие по запасам месторождения. Если бы причина корреляции заключалась только в этом, то корреляция величин запасов с разницей величин концентрации в верхней и нижней коре была бы меньшей, чем со значениями соберхания. Однако величина коэффициента корреляции оказалась даже чуть выше чем для корреляции величин запасов с содержанием соответствующих элементов в верхней и нижней коре. То есть, для процессов формирования месторождений важны не только средние концентрации данного компонента в литосфере, но и разница его концентраций в разных геохимических резервуарах тектоносферы. Результаты формальной кластеризации также дали неожиданно частую встречаемость кластеров с компонентами, обогащенными или только в верхней, или только в нижней континентальной коре.

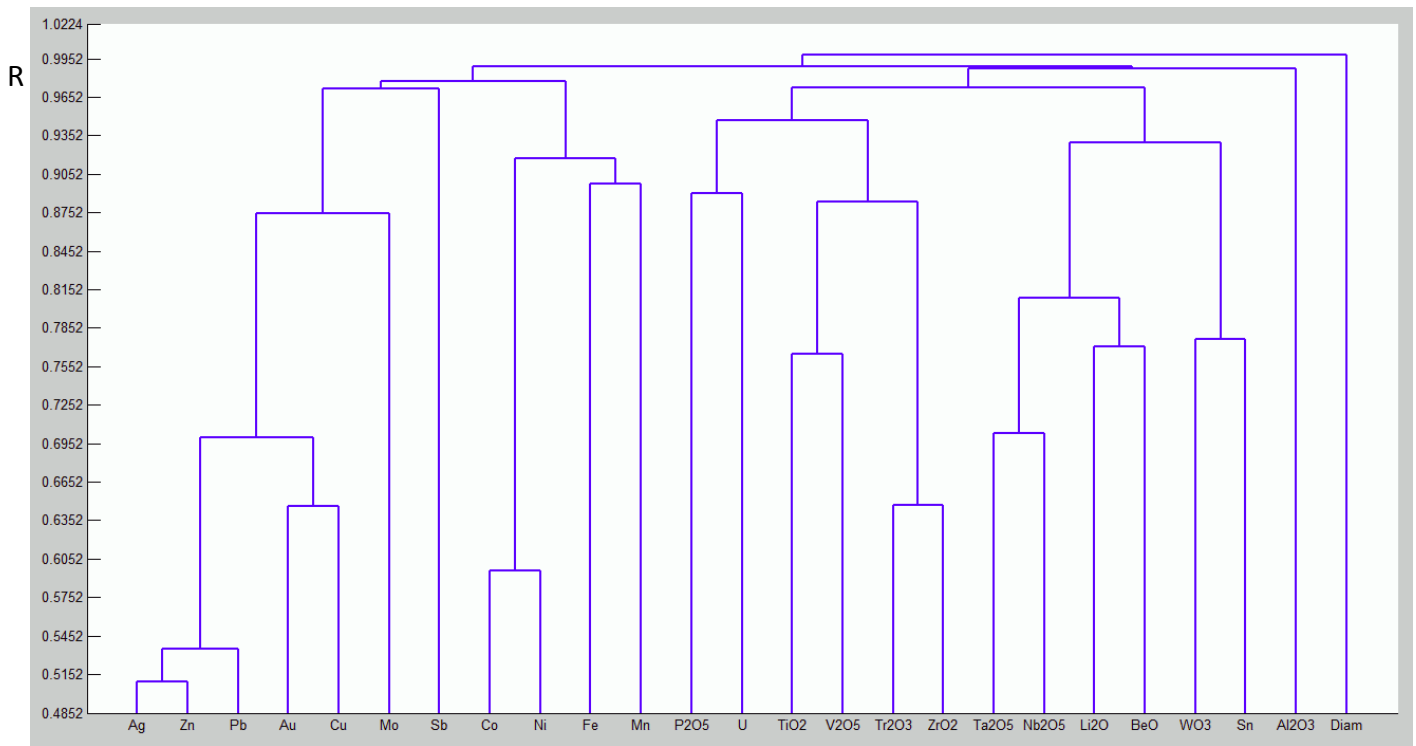


Рисунок 4 – Пример кластеризации. По вертикальной оси даны значения условного расстояния Танимото-Роджерса R . С ростом величин R происходит объединение в меньшее число кластеров

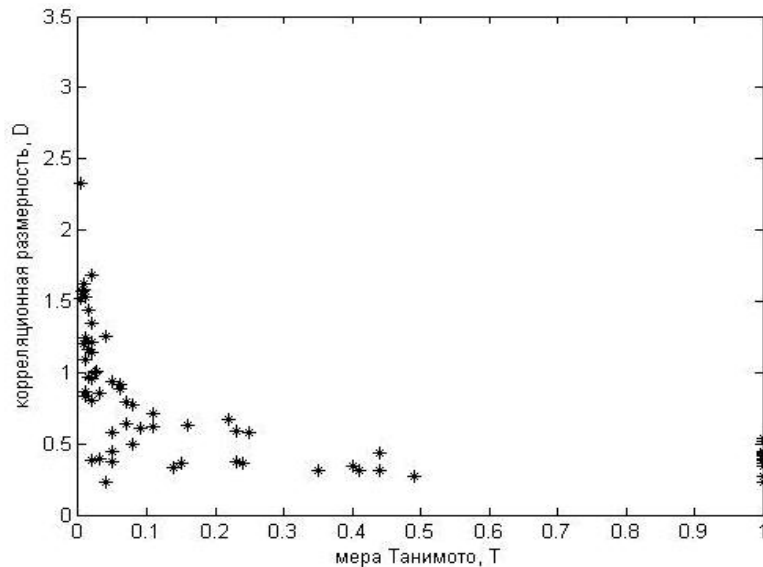


Рисунок 5 – Связь величин мер близости Танимото-Роджерса T и величин смешанной корреляционной размерности D . Случаям взаимного «притяжения» месторождений, малым значениям смешанной корреляционной размерности отвечают большие значения меры близости Танимото-Роджерса и наоборот

Результат свидетельствует, что формирование крупных и суперкрупных рудных месторождений является как бы продуктом преобразования (превращения) вещества тектоносферы между ее основными физико-геохимическими резервуарами (такими как верхняя и нижняя континентальная кора, океаническая кора, верхняя мантия). Видимо энергия этих превращений и

обеспечивает реализацию мощных негэнтропийных процессов концентрации рудного вещества в месторождениях. Модель позволяет подойти и к объяснению причин степенного распределения величин запасов в месторождениях. Если месторождения формируются на потоках вещества тектоносферы между разными ее резервуарами, то объемы запасов будут связаны с объемами претерпевшего преобразование вещества. Но установлено, что размеры отдельных террейнов, блоков, тектонических плит распределены по степенному закону. В этом случае степенная зависимость объемов запасов месторождений может порождаться степенной зависимостью объемов, претерпевающих превращение блоков тектоносферы. При этом находит возможное объяснение и положительная корреляция между объемами запасов и значениями концентрации руды в месторождениях. Действительно, если процесс формирования месторождений подобен конвейерной линии превращения вещества тектоносферы, то на этот «конвейер» будут поступать порции уже ранее обогащенного вещества. Соответственно, будет развиваться тенденция более высоких концентраций при больших объемах преобразуемого вещества, то есть для случая больших объемов запасов месторождений.

Отметим в заключении, что использованные методы достаточно общи и могут быть использованы также и в иных областях знания.

В **Заключении** формулируются основные результаты проведенных исследований:

1. На основе географической информационной системы «Крупные и суперкрупные месторождения» (ГИС КСКМ) и других источников была составлена база данных параметров крупных рудных месторождений мира: координаты и название каждого месторождения, объем запасов и концентрация (для каждого полезного компонента). Полученная база данных дополнена более детальными данными по месторождениям меди.
2. Подтверждена возможность описания эмпирических распределений величин запасов – степенным, а значений концентрации – логнормальным законом распределения. Подтверждение степенного распределения величин запасов, аналогичного закону Гутенберга-Рихтера, является дополнительным указанием на существенно неравновесный характер процессов, ответственных за формирование месторождений.
3. В рабочей среде Matlab подготовлены алгоритмы, генерирующие модельные примеры распределения гипотетических месторождений с контролируемыми параметрами распределения. На полученных модельных примерах опробованы методы фрактального корреляционного анализа: показаны пределы применимости метода, введено новое понятие смешанной корреляционной размерности. Опробованные методы применены для анализа эмпирических данных ранее сформированных баз данных по крупным и суперкрупным рудным месторождениям мира (на основе ГИС КСКМ с добавлениями) и базы данных по месторождениям меди.
4. Предложены меры близости на основе расчета смешанных корреляционных размерностей и на основе меры близости Танимото-Роджерса. Матрицы мер близости были использованы для проведения формальной кластеризации разных видов месторождений.
5. Кластеризация компонент рудных месторождений на основании меры близости Танимото-Роджерса выявляет кластеры элементов аналогичные тем, которые были скомпонованы ранее экспертным образом. К новым результатам кластеризации можно отнести тенденцию частого

выявления кластеров, составленных преимущественно из элементов с обогащением либо в верхней, либо в нижней континентальной коре.

6. Результаты кластеризации месторождений, полученные независимыми методами (на основе расчета смешанной корреляционной размерности и меры близости Танимото-Роджерса) и по независимым данным (по пространственному расположению и по наполнению рудных месторождений) оказались тесно коррелированными, что указывает на корректность обоих этих подходов, возможность проведения на их основе содержательной формальной классификации компонент месторождений и на возможность получения общей классификации, путем объединения обоих этих подходов.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в реферируемых изданиях, рекомендованных ВАК

1. Power distributions in ore and oil genesis – interpretation and generating mechanisms / M.V. Rodkin, I.A. Zotov, E.M. Grayeva, L.M. Labuntsova, A.R. Shatakhtsyan // Russian Journal of Earth Sciences. – 2010. – Т. 11, № 3. – DOI:10.2205/2009ES000408.
2. Родкин, М.В. Статистический анализ данных по крупным и суперкрупным месторождениям: эмпирические закономерности и интерпретация / М.В. Родкин, А.Р. Шатахцян // Геоинформатика. – 2013. – № 4. – С. 25-32.
3. Родкин, М.В. Исследование рудных месторождений методами анализа динамических систем. I. Расчет корреляционной размерности / М.В. Родкин, А.Р. Шатахцян // Физика Земли. – 2015. – № 3. – С. 102–111.
4. Родкин, М.В. Исследование рудных месторождений методами анализа динамических систем. II. Кластеризация рудных месторождений и ее интерпретация. / М.В. Родкин, А.Р. Шатахцян // Физика Земли. – 2015. – № 3. – С. 112-121.

Другие публикации

1. Родкин, М.В. Рудные месторождения – порождение круговорота вещества в тектоносфере / М.В. Родкин, А.Р. Шатахцян // Земля и Вселенная. – 2013. – № 4. – С. 3-13.
2. Rodkin, M.V. Main Statistical Features of Major Ore and Oil Deposits / M.V. Rodkin, A.R. Shatakhtsyan // The earth expansion evidence – A Challenge for Geology, Geophysics and Astronomy: Selected Contributions to the Interdisciplinary Workshop held in Erice, Sicily, Italy, 4-9 October 2011. Roma, 2012. P. 439-447.
3. Родкин, М.В. Опыт классификации рудных месторождений на основе использования иерархической ультраметрической метрики и меры Танимото / М.В. Родкин, А.Р. Шатахцян, Е.М. Граева // Свойства, структура, динамика и минерагения литосферы Восточно-Европейской платформы: мат-лы XVI Международной конференции, 20–24 сентября 2010 г. – Воронеж: Научная книга, 2010. – Т. II. – С. 182-186.
4. Родкин, М.В. Модели процессов рудо- и нефтегенеза, обеспечивающие реализацию эмпирических законов распределения величин запасов месторождений и концентраций / М.В. Родкин, Е.М. Граева, А.Р. Шатахцян // Тектоника и геодинамика складчатых поясов и платформ фанерозоя: мат-лы XLIII Тектонического совещания. – М.: ГЕОС, 2010. – Т. 2. – С. 210-213.
5. Модели генерации степенных распределений в рудо- и нефтегенезе: от порождающих механизмов к прогнозным признакам / Родкин М.В., Зотов И.А., Граева Е.М., Лабунцова Л.М., Шатахцян А.Р. // Итоги Электронного Геофизического Года: мат-лы Международной конференции, 3–6 июня 2009 г., Переславль-Залеский. – М.: Геофизический центр РАН, 2009. – С. 104-105.
6. Родкин, М.В. Модель рудогенеза как следствия перераспределений вещества между различными резервуарами тектоносферы / М.В. Родкин, А.Р. Шатахцян // Новые горизонты в

- изучении процессов магмо- и рудообразования: мат-лы Всероссийской конференции, посвященной 80-летию Института геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН (ИГЕМ РАН), г. Москва, 4–7 октября 2010 г. – М.: ИГЕМ РАН, 2010. – С. 143-144.
7. Шатахцян, А.Р. Сравнение распределения крупных и суперкрупных рудных месторождений / А.Р. Шатахцян // Комплексное изучение и оценка месторождений твердых полезных ископаемых: тез. докл. Третьей научно-практической конференции молодых ученых и специалистов, посвященной 125-летию со дня рождения первого директора ВИМСа Н.М. Федоровского, Москва, 17–18 мая 2011 г. – М., 2011. – С. 117-119.
 8. Родкин, М.В. Распределения величин запасов рудных месторождений - аналог закона Гутенберга-Рихтера? Модели реализации распределения / М.В. Родкин, А.Р. Шатахцян // Тектоника, рудные месторождения и глубинное строение Земной коры: мат-лы Всероссийской научной конференции, посвященной 100-летию со дня рождения члена-корреспондента РАН С.Н. Иванова, 24–26 мая 2011 г., Екатеринбург. – Екатеринбург, 2011. – С. 236-238.
 9. Родкин, М.В. Некоторые статистики рудных и УВ месторождений – выводы о характере их генезиса / М.В. Родкин, А.Р. Шатахцян // Геодинамика, геомеханика и геофизика: мат-лы 11-го Всероссийского семинара (п. Новый Энхалук, Республика Бурятия, 25–31 июля 2011 г.). – 2011. – С. 36.
 10. Родкин, М.В. Кластеризация рудных месторождений по их составу и пространственному расположению / М.В. Родкин, А.Р. Шатахцян, И.Б. Гусев // Геодинамические процессы и природные катастрофы в Дальневосточном регионе: тез. докл. научной конференции, посвященной 65-летию Института морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, 26–30 сентября 2011 г. – Южно-Сахалинск, 2011. – С. 9.
 11. Родкин, М.В. Процессы рудо- и нефтегенеза как побочный продукт перераспределения вещества между различными резервуарами земной коры и мантии / М.В. Родкин, А.Р. Шатахцян, Е.М. Граева // Дегазация Земли и генезис нефтегазовых месторождений. – М.: ГЕОС, 2011. – С. 93-114.
 12. Родкин, М.В. О формальной кластеризации рудных месторождений на основе расчета мер близости и фрактальной размерности / М.В. Родкин, А.Р. Шатахцян // Геодинамика, рудные месторождения и глубинное строение литосферы: мат-лы Всероссийской научной конференции с международным участием (XV Чтения памяти А.Н. Заварицкого). – Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2012. – С. 223-225.
 13. Родкин, М.В. Фрактальная размерность размещения рудных месторождений на земной поверхности: связь с ультраметрической мерой Роджерса-Танимото / М.В. Родкин, А.Р. Шатахцян // Геологическая среда, минерагенические и сеймотектонические процессы: мат-лы 28-й Международной конференции, 24–29 сентября 2012 г., Воронеж. – Воронеж: ИПЦ «Научная книга», 2012. – С. 302-305.
 14. Родкин, М.В. Рудные месторождения как продукт деятельности геодинамических систем: статистики, фрактальные размерности, выводы о процессах формирования / М.В. Родкин, М.Ю. Андреева, А.Р. Шатахцян // Тектоника, глубинное строение и минерагения Востока Азии: VIII Косыгинские чтения: материалы Всероссийской конференции, 17–20 сентября 2013 г., Хабаровск. – Владивосток: Дальнаука, 2013. – С. 321-324.
 15. Родкин, М.В. Не являются ли рудные месторождения побочным результатом превращений вещества между разными геохимическими резервуарами тектоносферы? / М.В. Родкин, А.Р. Шатахцян // Физико-химические исследования в науках о Земле: мат-лы Четырнадцатой международной конференции, Борок, 7–10 октября 2013 г. – М., 2013. – С. 232-234.
 16. Процессы массивированного рудообразования как побочный продукт процессов тектогенеза (по результатам статистического анализа параметров месторождений) / М.В. Родкин, А.Р. Шатахцян, М.Ю. Андреева, Т.А. Рукавишникова // Тектоника складчатых поясов Евразии: мат-лы XLVI Тектонического совещания. – М.: ГЕОС, 2014. – Т. 2. – С. 130-134.

17. Шатахцян, А.Р. Применение методов расчета фрактальной размерности к данным по рудным месторождениям – новые подходы и результаты / А.Р. Шатахцян // Тектоника современных и древних океанов и их окраин: мат-лы XLIX Тектонического совещания. – М.: ГЕОС, 2017. – Т. 2. – С. 288-291.