

Оригинальная статья / Original article

УДК 553.04+549.09

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/2541-9455-2018-41-3-106-118>

ФРАКТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ – НЕОБХОДИМЫЙ ЭЛЕМЕНТ ГЕОМЕТРИЗАЦИИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

© В.И. Снетков^a

^aИркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

РЕЗЮМЕ. Цель. Обосновать необходимость учета фрактальности среды при оконтуривании рудных зон, тел, проведении геометризации месторождений полезных ископаемых. Найти условия совместимости детерминистской теории слоисто-струйчатого геохимического поля профессора П.К. Соболевского в условиях фрактальной среды. **Методы.** Обзор литературных источников и исследований в области синергетики, фрактальной геометрии. Математическая обработка и анализ фрактальных геологических систем. **Результаты.** В самоорганизующейся динамической системе доминируют нелинейные связи, а положение каждого фрактала в условиях «детерминированного хаоса» случайно и непредсказуемо. Существующее детерминистское представление о месторождении как о геохимическом поле (П.К. Соболевский), удовлетворяющем условию конечности, однозначности, непрерывности, плавности и имеющем слоисто-струйчатую структуру, входит в противоречие с дискретностью распределения полезных компонентов, неоднозначностью данных (для конкретной точки пространства). Противоречие можно устранить, если рассматривать геохимическое поле не в точке, а в некотором объеме, относя содержание полезного компонента или другие показатели к центру этого объема. Метод изолиний вошел практически во все области научного знания, он нагляден, достаточно информативен, и от него нельзя отказаться. **Выводы.** Методическая основа геометризации, включающая системный подход в научных исследованиях, должна быть дополнена и фрактальным анализом, ныне являющимся неотъемлемой частью синергетики. Это позволит более рационально подходить к обоснованию и выбору технологических решений для отработки геологического объекта. При адаптации теории геохимического поля не к точке, а к определенному объему пространства недр возникает случайная компонента, поэтому оперировать необходимо со случайными пространственными полями, где главенствующими становятся вероятностные методы, теория случайных функций, геостатистика.

Ключевые слова: геометризация, фрактал, аттрактор, фрактальная размерность, россыпь, плотик, параметры разведочной сети.

Информация о статье. Дата поступления 7 августа 2018 г.; дата принятия к печати 28 августа 2018 г.; дата онлайн-размещения 28 сентября 2018 г.

Формат цитирования. Снетков В.И. Фрактальный анализ – необходимый элемент геометризации месторождений полезных ископаемых // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых. 2018. Т. 41. № 3. С. 106–118. DOI: 10.21285/2541-9455-2018-41-3-106-118

FRactal Analysis as a Key Element of Mineral Deposit Geometrization

© V.I. Snetkov^a

^aIrkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russian Federation

^aСнетков Вячеслав Иванович, доктор технических наук, зав. кафедрой прикладной геологии, геофизики и геоинформационных систем, тел.: 8 (3952) 405362, e-mail: snetkov@istu.edu

Vyacheslav I. Snetkov, Doctor of technical sciences, Head of the Department of Applied Geology, Geophysics and Geoinformation Systems, tel.: 8 (3952) 405362, e-mail: snetkov@istu.edu

ABSTRACT. The **Purpose** of the paper is to prove the need for accounting the environment fractality under countouring of ore zones, bodies and geometrization of mineral deposits as well as to find the conditions of compatibility of the deterministic theory of the stratified geochemical field of the professor P. K. Sobolevsky in the conditions of fractal environment. **Methods.** The study uses the review of literature and researches in the field of synergetics and fractal geometry as well as mathematical processing and analysis of fractal geological systems. **Results.** The self-organizing dynamic system features the domination of nonlinear relationships, while the location of each fractal in the conditions of "the determined chaos" is random and unpredictable. The existing deterministic idea of a deposit as a geochemical field (P. K. Sobolevsky) meeting the condition of finitude, unambiguity, continuity, smoothness and having a stratified structure is in a conflict with the distribution discreteness of useful components, ambiguity of data (for a specific point of space). The contradiction can be eliminated if a geochemical field is considered in some volume rather than in a point and the content of a useful component or other indicators are referred to the center of this volume. The method of isolines is introduced in practically all areas of scientific knowledge. It is evident, informative enough and it is impossible to refuse it. **Conclusions.** The fractal analysis should be added to the methodical basis of geometrization with a system approach in scientific researches as its element since it is an integral part of synergetics today. It will allow a more rational justification and selection of technological decisions for geological object development. When the theory of geochemical field is adapted to a certain volume of subsoil rather than to a point we obtain a random component. Therefore, it is necessary to operate random spatial fields where probabilistic methods, the theory of stochastic functions and geostatistics predominate.
Keywords: geometrization, fractal, attractor, fractal dimension, placer, placer bedding, exploration network parameters

Article info. Received 7 August 2018; accepted for publication 28 August 2018; available online 28 September 2018.

For citation. Snetkov V.I. Fractal analysis as a key element of mineral deposit geometrization. *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya Seksii nauk o Zemle Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Geologiya, razvedka i razrabotka mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh* = Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Exploration and Development of Mineral Deposits, 2018, vol. 41, no. 3, pp. 106–118. DOI: 10.21285/2541-9455-2018-41-3-106-118 (In Russian).

Введение

Методическая основа geometrization предполагает наличие совокупности теоретических и практических положений, позволяющих решать вопросы сбора, изучения, обработки, систематизации, обобщения информации, математического или графического представления основных закономерностей строения месторождения полезного ископаемого в его разведанной части.

В этом процессе важную роль играет степень приближения знаний науки о природных и геологических процессах, фундаментальные законы которых или хотя бы их формализация являются залогом успешного построения адекватных моделей (геологических, геометрических, математических, имитационных, прогнозических и др.) [1, 2]. Однако в генезисе сложных геологических систем пока остается много вопросов, на которые либо нет ответа, либо классические подходы к которым не обеспечивают требуемой точности решения поставленных задач

[3, 4]. Особенно это касается вопросов оконтуривания, подсчета запасов на месторождениях редких и цветных металлов, драгоценных камней.

Методы исследования

Дадим краткий обзор опубликованной литературы, связанной с фрактальным анализом. В 60-х годах прошлого века в результате научных поисков мировой науки И.Р. Пригожиным была разработана теория самоорганизации в неравновесных системах, впоследствии названная Г. Хакеном как «Синергетика» [5], а также фрактальная геометрия, разработанная Б.Б. Мандельбротом [6]. Эти теории давно ждали, и они оказались к месту не только в термодинамике, математике, химии, физике, астрономии [7–10], но и в геологических науках, где получили интенсивное развитие [11–19] и др. В работе Л.А. Пучкова и В.Д. Аюрова [20] убедительно показана целесообразность и допустимость синергетического подхода не только в геологии, но также и в горных науках, в том числе и в геомет-

рии недр, одной из целей которой является изучение закономерностей строения месторождений полезных ископаемых и распределения в них как полезных, так и вредных компонентов. Для этого геометризация должна базироваться на синергетике [5], теории диссипативных структур [21], фрактальном анализе и частично на единой теории всех взаимодействий в веществе [7], концепции системного движения материи [17].

Основоположителем фракталов считается математик Б.Б. Мандельброт, опубликовавший с 1967 года ряд фундаментальных работ и впоследствии открывший множество, носящее теперь его имя. Понятие фрактала выделяет объекты, обладающие структурами различных масштабов, как больших, так и малых, и отражающие иерархический принцип их организации и самоорганизации. В этом понятии содержится важные моменты – система должна быть нелинейной, кроме того, необходима некоторая идеализация действительности: фрактальные объекты самоподобны и дискретны. Б.Б. Мандельброт открыл принцип, с помощью которого можно получить множество самоподобных фигур на различных уровнях иерархически организованных структур.

Для реализации указанного принципа кроме обратной связи требуется нелинейная зависимость между результатом и начальным значением; иначе говоря, динамический закон вида [6]

$$x_{n+1} = f(x_n)$$

должен быть отличным от простой пропорциональности. Одним из тестов, определяющих нелинейность системы, являются числа Фейгенбаума [5, 6].

Нелинейная последовательность α_n в случае, когда происходит удвоение периода, должна удовлетворять простому закону:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \lim \left(\frac{\alpha_n - \alpha_{n-1}}{\alpha_{n+1} - \alpha_{n-1}} \right) = \delta,$$

где δ – число Фейгенбаума, $\delta = 4,6692016609...$

Принцип самоподобия наблюдается не только в физических или нелинейных термодинамических процессах, но и в приближенном виде в природе: в линиях берегов морей, рек и ручейков, в очертаниях облаков и деревьев, в турбулентном потоке жидкости, в иерархической организации живых систем. Процессы самоорганизации неравновесных систем характерны для многих физических, математических, химических задач и не только. Они касаются хаоса (случайности) и порядка (закономерности), их конкуренции или сосуществования в природных системах [1–3, 10, 22]. Все они имеют одно общее начало – конкуренцию нескольких центров (аттракторов) за доминирование на плоскости. Любая начальная точка x_0 в процессе самоорганизации либо приходит к тому или другому центру, либо находится на границе, не приняв определенное решение. С изменением управляющего параметра самоорганизующейся системы (гидродинамические условия, условия выветривания, автоволны Земли, геотектоника и др.) изменяются и области, принадлежащие аттракторам, а вместе с ними и их границы [13–17]. В этом случае, как теоретически и графически показано в работе Х.-О. Патгейна и П.Х. Рихтера [6], простых границ между территориями (фракталами) в результате такого соперничества не бывает. Чаще всего имеет место их фирменное переплетение и непрерывающаяся борьба даже за самые малые участки. Именно в этих пограничных областях образуются так называемые множества Жюлиа и происходит переход от одной формы существования вещества к другой: от порядка к хаосу, но хаосу, внутри которого действуют законы синергетического устройства Природы.

Рудные, россыпные и другие месторождения полезных ископаемых не являются в своем роде исключениями из

перечня объектов, к которым возможно применение перечисленных теорий, поскольку они сами – суть Земли, Природы и Вселенной [11–17]. Так, например, на космических снимках [1, 3] в зональном спектре русловых речных отложений зернистого материала отчетливо выделяется сегрегация так называемой «струи» на отдельные элементы, которые можно отождествить с «линзами», состоящими из еще более мелких объектов. Подобная картина отмечается и в распределении содержаний полезных компонентов на многих месторождениях (коренных и россыпных) независимо от их генезиса [15, 18, 19].

Если перенести эту парадигму на процессы накопления вещества, например, в алмазоносной россыпи, то здесь просматривается очень много параллелей. Система «россыпь» может быть отнесена к категории диссипативных, поскольку с течением времени происходит потеря энергии и вещества и объем элемента фазового пространства сокращается, причем фазовый поток сжимает элементарный объем в одних направлениях (борта россыпи) и растягивает его в других (по простиранию) [22]. Это, в свою очередь, предполагает множество возможных направлений эволюции диссипативного процесса и нелинейность среды [21]. Последнее свойство является существенным ограничителем сферы действия детерминистских (классических) позиций, евклидовой геометрии и предполагает иные оценки и подходы к прогнозированию природных процессов.

Результаты

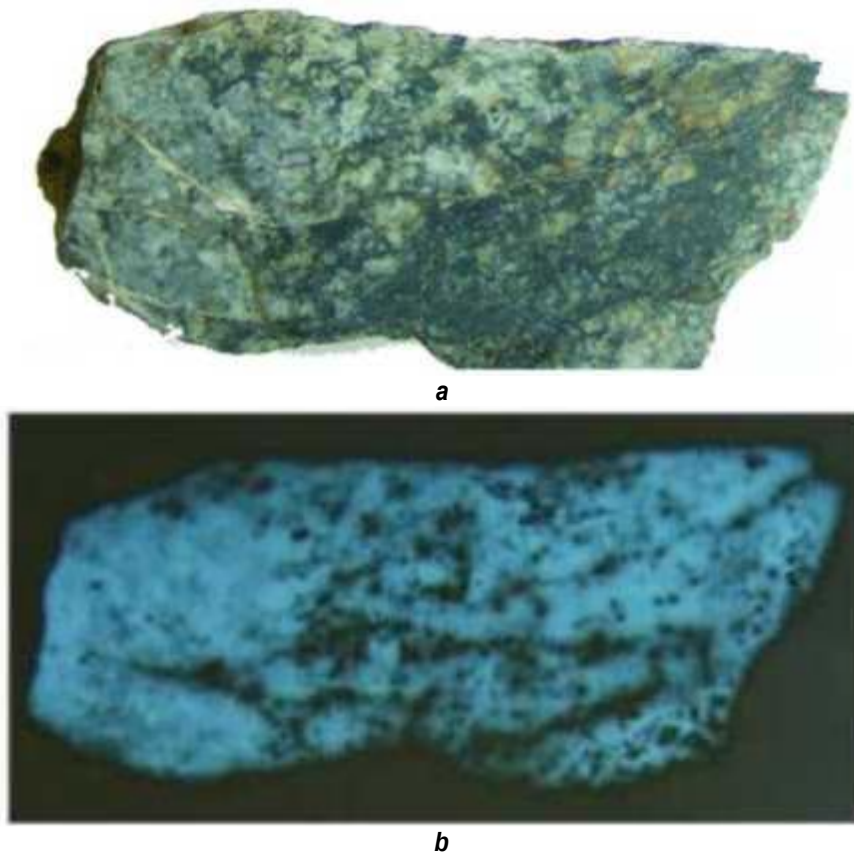
Приведем два примера.

1. На рис 1, а. представлен образец и характер распределения урана (рис. 1, б, радиография, темное – радиоактивные минералы), а на рис. 2 – проявления и аномалии урана, полученные по разным масштабам съемки [19]. Нетрудно заметить схожесть картины распределения урана в образце с рудопроявлениями, но

уже в другом иерархическом уровне, в другом масштабе проявления. Такое строение, самоподобие с позиций синергетики можно квалифицировать как фрактальное.

2. Структура плотика влияет на размещение полезного компонента в теле россыпи так, что «форма и размеры обогащенных участков полностью определяются распределением, формой и размерами углублений в поверхности плотика» [23]. Это классическое определение весьма близко к принципам синергетического устройства микро- и макромира. На рис. 3 показана пространственная структура плотика одной из алмазоносных россыпей Западной Якутии, представленная чередованием углублений (помечены звездочками) и выступов с эффектом вложенности (показано пунктиром) и размерами в плане от 10 до 1000 м. Характерная общая деталь – данные структуры повторяются в разных масштабах (эффект «скейлинга» [5, 6, 9, 16]).

Поперечные размеры пропорциональны основной вмещающей структуре – плотику, что позволяет говорить о его влиянии на геометрию вложенных структур (углублений, «западений», «карманов» [24] и т. п.). Из этого можно предположить, что структура плотика обладает признаками самоорганизующейся, нелинейной системы [5]. Степень нелинейности системы оценивается фрактальной размерностью D геометрического объекта [9]. Размерность, определенная клеточным методом [10] по разведочным линиям, изменяется в диапазоне от 0,4 до 0,77, в среднем составляет 0,56 (показатель Херста $H = 0,44$). Этот результат представляет практический интерес для разведочных работ, поскольку при $H \approx 0,5$ имеет место фрактальное броуновское движение (хаос, случайный процесс), и, соответственно, этот фактор следует учитывать при обосновании плотности сети для определенной стадии разведочных работ.



**Рис. 1. Катаклазированный биотитизированный гранит с гнездово-вкрапленными и прожилковыми выделениями уранинита и настурана в биотит-хлоритовых агрегатах
Проявление Авдеевское. Бульбухтинский ураново-рудный узел
Длина образца – 10 см (по В.В. Корнакову [17])**

a – приполировка образца; b – радиографическое изображение

Fig. 1. Cataclastic biotitized granite with the nested veinlet-impregnated depositions of uraninite and nasturan in biotite – chlorite units

Avdeevskoye manifestation. Bulbukhtinsky uranium-ore cluster

Sample length is 10 cm (according to V.V. Kornakov [17])

a – sample surfacing; b – radio graphic image

По представленному на рисунке участку россыпи проведено определение фрактальной размерности плотика и тенденция ее изменения по падению россыпи (рис. 4) по данным линий детальной разведки (ДР).

Полученная фрактальная размерность плотика позволяет сделать вывод, что характер его изменения вкрест простирания россыпи по 12 линиям (начало и конец участка россыпи) ближе к состоянию антиперсистентности, то есть к непредсказуемости тенденции изменения отметок между соседними точками (шурфами), что означает: разведочная

сеть шурфов по разведочным линиям слишком разрежена и не выявляет локальные закономерности изменения отметок плотика вкрест простирания россыпи (аналогичное заключение получено с использованием разностных методов и теории случайных функций). На этом основании можно предполагать существование в плотике других, масштабно более мелких подобных структур [16], которые являются латентными (скрытыми) и могут быть выявлены только при значительном сгущении разведочной сети или при постановке специальных методов исследований.

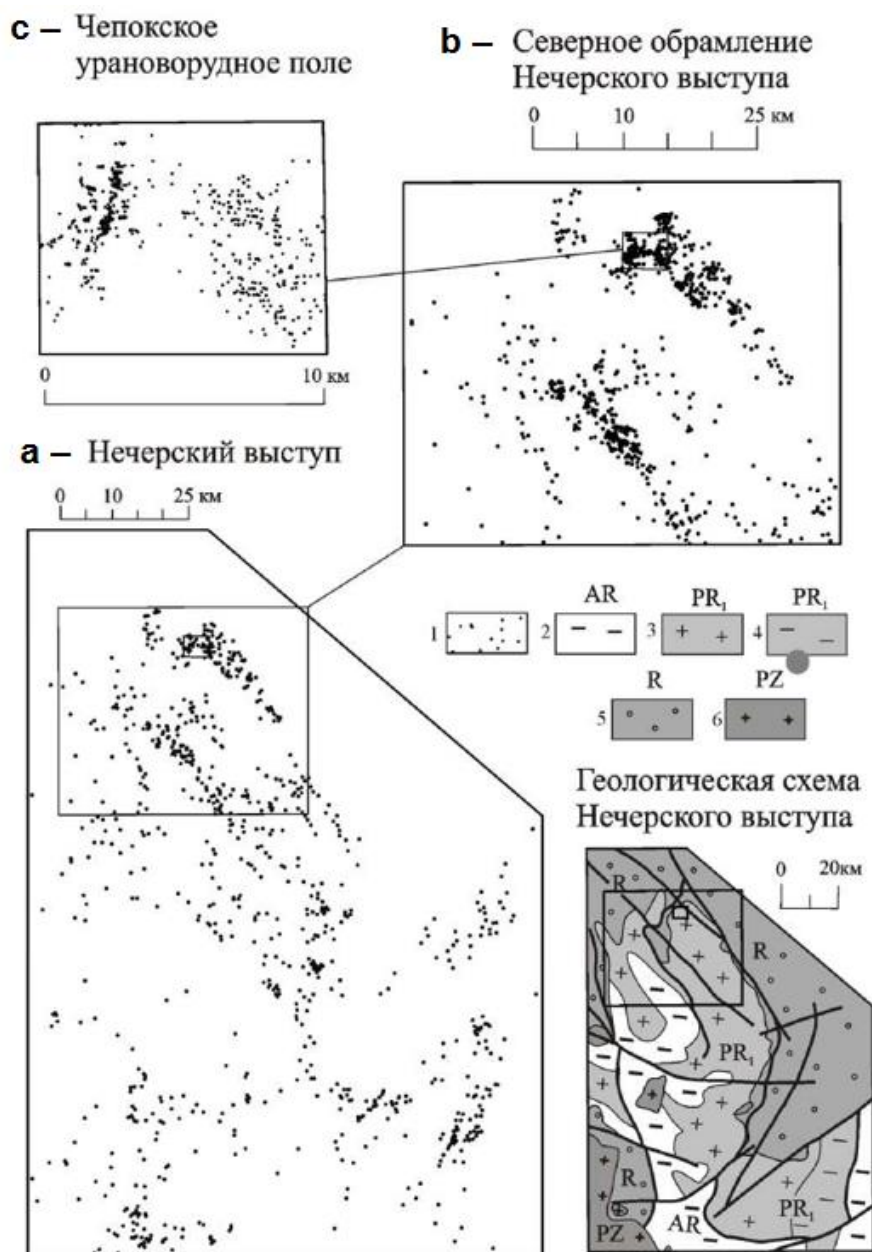


Рис 2. Фактографический материал по урану:

1 – проявления и аномалии урана по данным: а – аэрогаммасъемки масштаба 1:200000, б – геологическое доизучение площадей и прогнозно-поисковых работ масштаба 1:50000, с – поисковых работ масштаба 1:10000–1:5000; 2–4 архей-раннепротерозойское кристаллическое основание: 2 – архейские гранитоиды и гранито-гнейсы, 3 – раннепротерозойские гранитоиды, 4 – раннепротерозойские углеродисто-терригенные комплексы; 5 – субплатформенные углеродисто-карбонатно-терригенные образования рифея; 6 – гранитоиды палеозойской тектоно-магматической активизации (по В.В. Корнакову [19])

Fig. 2. Factual material on uranium:

1 – uranium manifestations and anomalies according to the data: а – airborne gamma survey of scale 1:200000, б – additional site exploration and prospecting and exploration works of scale 1:50000, с – exploration works of scale 1:10000–1:5000; 2–4 Archean – early Proterozoic crystalline basement: 2 – Archean granitoids and granite-gneiss, 3 – early Proterozoic granitoids, 4 – early Proterozoic carbonaceous terrigenous complexes; 5 – subplatform carbonaceous and carbonate and terrigenous Riphean formations; 6 – granitoids of Paleozoic tectonic-magmatic activation (according to V.V. Kornakov [19])

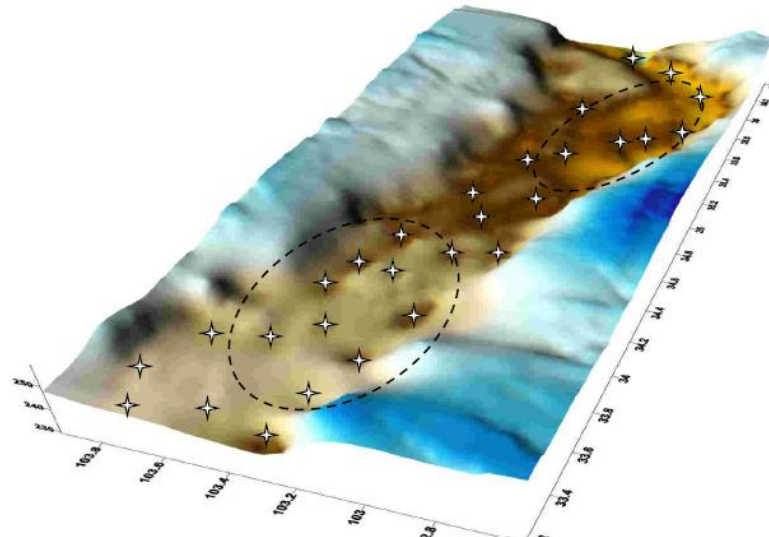


Рис. 3. Объемное изображение плана плотика по участку 1 Широкий
Fig. 3. 3D image of the placer bedding plan for the site Shirokiy 1

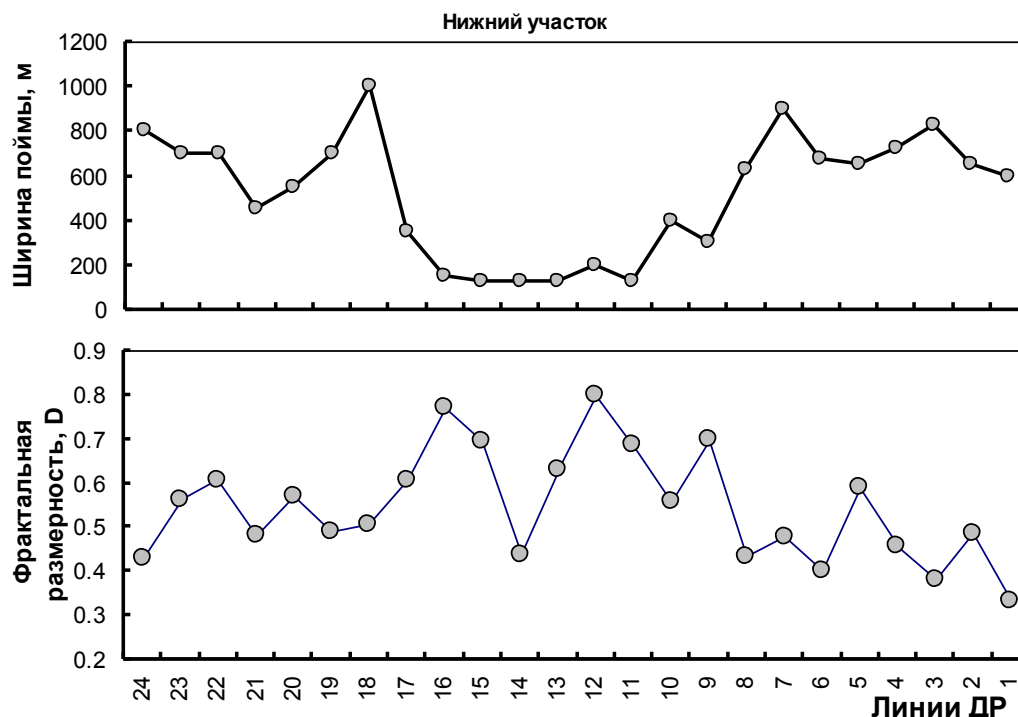


Рис. 4. Зависимость фрактальной размерности плотика от ширины пойменной части россыпи
Fig. 4. Dependence of fractal dimension of placer bedding on the width of alluvial deposit inundated part

Другая особенность: на графике просматривается связь фрактальной размерности плотика с шириной пойменной части россыпи (коэффициент корреляции равен -0,615). С увеличением ширины поймы фрактальная размерность уменьшается, а это означает рост антиперсистентности динамики изменения отметок

плотика (происходит бессистемная частая смена понижения и повышения отметок), то есть усиливается степень изрезанности поверхности коренного ложа россыпи по данным детальной разведки. Увеличение плотности разведочной сети шурфов вкост простирания может уменьшить антиперсистентность, тем

самым улучшить детализацию поведения коренного ложа и увеличить вероятность встречи различного рода западений плотика, являющихся центрами аккумуляции алмазонасных отложений.

Обсуждение

Одним из главных аттракторов (фокусов) [5, 6, 9, 10] является источник питания россыпи, обычно это кимберлитовая трубка с фрактальным размещением кристаллов алмазов, второй аттрактор находится в бесконечности. Граница влияния первого аттрактора (трубки) – внешний контур делювиальной россыпи, окаймляющей ее. Аллювиальная россыпь, непосредственно примыкающая к делювиальной, является зоной влияния второго аттрактора, также находящегося в бесконечности. Здесь возникает множество фракталов, связанных с одним, двумя и более устойчивыми и неустойчивыми аттракторами [3, 6, 9]. В этом случае фрактальный характер приобретают практически все компоненты россыпи: форма, очертания береговой линии, песчано-гравийно-галечные отложения, их гранулометрический состав, рельеф плотика, пространственное положение зерен полезного и сопутствующих компонентов [3].

С позиций фрактальной геометрии углубления в плотике выполняют роль устойчивых и неустойчивых аттракторов (фокусов), которые в силу своих особых свойств [5] являются центрами притяжения кристаллов алмазов, удельный вес которых существенно отличается от удельного веса вмещающих пород. В соответствии с определением, данным Г. Шустером (1988), аттракторы можно квалифицировать как «странные аттракторы» или аттракторы Лоренца. Основные их признаки – «локализация в ограниченной области фазового пространства, чувствительность к начальным условиям, структурная устойчивость и типичность» [22]. Они естественным образом возникают в динамической самоорганизующейся нелинейной системе, «когда

фазовый поток сжимает элементарный объем в одних направлениях и растягивает его в других» [6, с.110], то есть в момент формирования россыпи. В соответствии с теорией «странного аттрактора» траектория точки, попавшая в его зону влияния, чувствительна к начальным условиям, хаотична, притягивается к ограниченной области в фазовом пространстве, объем этой области стремится к нулю. Отсюда следует, что частицы полезного компонента (алмаза), попадая в зону влияния обычного аттрактора (аттрактор Лоренца), должны стремиться к его центру или в случае бифуркации аттрактора попадать на орбиты предельных циклов, образуя локальные скопления, стремящиеся к минимизации своих размеров [22]. Форма таких скоплений должна быть изометричной или пропорциональной геометрии вмещающей структуры. В соответствии с принятой терминологией эти скопления можно определить как фрактальные кластеры или «гнезда» [3].

В результате появляются отдельные участки россыпи, локальные обособления кристаллов алмазов (гнезда) и других компонент, захваченные аттракторами в пределах своих зон влияния и имеющие также фрактальный характер (строгое математическое доказательство именно захвата содержится в работе Г. Шустера [22]). Форма границ каждого фрактала определяется начальными условиями, геометрией вмещающей структуры, результатами борьбы двух аттракторов за зоны влияния, особенностями турбулентной (во времени и пространстве) среды водно-аллювиального потока.

Следовательно, методика разведочных работ должна быть построена таким образом, чтобы была возможность выявлять форму, границы фракталов и вложенных фрактальных структур, а число выявленных «гнезд» позволяло бы оценить среднее содержание и среднюю

гранулометрию по разведочной линии, близкие к их математическому ожиданию. В противном случае всегда будет существовать эффект недоразведанности, выражающийся в нестабильности оценок средних содержаний в разведанных блоках или в коэффициенте намыва, превышающем 1. При этом самые изощренные математические методы, в том числе и моделирование, не позволят создавать высокоточные адекватные геологические модели. Очевидно, что без постановки экспериментальных работ эту задачу решить непросто. Из математических вероятностных методов, возможно, подойдет метод, называемый «Задача Бюффона», но это требует особого изучения.

Из сказанного следует, что методическая основа геологоразведочных работ должна быть дополнена и фрактальным анализом, ныне являющимся неотъемлемой частью синергетики. Если этого не делать и дальше, то ни сложные методы, ни геометризация месторождения не позволят существенно улучшить прогнозные оценки и подсчет запасов. Методическая же основа геометризации, включающая системный подход в научных исследованиях, также должна быть дополнена элементами фрактального анализа.

Заключение

Чем могут быть полезны эти дополнения в практическом плане?

Во-первых, они дают понимание того, что в самоорганизующихся динамических системах, к которым относятся месторождения полезных ископаемых, доминируют нелинейные связи, распределение полезных и других компонентов носит фрактальный характер, а положение каждого фрактала в условиях «детерминированного хаоса» случайно и непредсказуемо, поэтому любая модель и методика разведки месторождений должны строиться с учетом отмеченных обстоятельств.

Во-вторых, позволяют более рацио-

нально подходить к обоснованию и выбору технологических решений для разработки геологического объекта.

В-третьих, являются поводом для дальнейшего развития и уточнения теорий образования месторождений полезных ископаемых, распределения полезных компонентов в рудных телах, сочетающих известные фундаментальные представления с синергетическим подходом.

В-четвертых, необходимо понимание того, что существующее детерминистское представление о месторождении как о простом геохимическом поле (П.К. Соболевский) [25], удовлетворяющем условию конечности, однозначности, непрерывности, плавности и имеющему слоисто-струйчатую структуру, входит в противоречие с дискретностью распределения полезных компонентов, неоднозначностью данных (для конкретной точки пространства). Этим противоречием объясняются многие несоответствия и расхождения при оценке месторождений и запасов.

Какой видится выход из данной ситуации? Метод изолиний вошел практически во все области научного знания, он нагляден, достаточно информативен, и вряд ли от него можно отказаться. Ряд авторов считает, что данное противоречие можно устранить, если рассматривать геохимическое поле не в точке, а в некотором объеме, относя содержание полезного компонента или другие показатели к центру этого объема. В этом случае получается псевдонепрерывность и однозначность, дающая возможность применять метод изолиний. Однако в таком случае кроме детерминированной составляющей возникает случайная компонента и оперировать необходимо со случайными пространственными полями, где главенствующими становятся вероятностные методы, теория случайных функций, геостатистика. К сожалению, специалисты-производственники пока к такому шагу не готовы.

Библиографический список

1. Снетков В.И. Разработка методов квалиметрии недр при моделировании и количественной оценке качества источника георесурсов // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2005. № 8. № 406/08-05 – 04.03.05. 79 с.
2. Снетков В.И. Концепция прогнозирования запасов в сложноструктурных месторождениях // Маркшейдерия и недропользование. 2006. № 4 (24). С. 19–24.
3. Снетков В.И., Тальгамер Б.Л., Дементьев С.А. Гнездообразное распределение алмазов в россыпи – основная причина неподтверждения запасов // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2005. № 8. № 409/08-05 – 05.04.05. 79 с.
4. Филонюк В.А., Дубовская И.А. О некоторых причинах низкой эффективности геолого-методического обеспечения современных поисково-разведочных и эксплуатационных технологий в золотодобывающей отрасли // Известия Сибирского отделения секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. 2016. № 3 (56). С. 29–43.
5. Хакен Г. Синергетика: иерархии неустойчивостей в самоорганизующихся системах и устройствах / пер. с англ. Ю.А. Данилова; под ред. Ю.Л. Климонтовича. М.: Мир, 1985. 423 с.
6. Патгейн Х.-О., Рихтер П.Х. Красота фракталов. Образы комплексных динамических систем / пер. с англ. П.В. Малышева, А.Г. Сивака; под ред. А.Н. Шарковского. М.: Мир, 1993. 176 с.
7. Герловин И.Л. Основы единой теории всех взаимодействий в веществе. Л.: Энергоатомиздат, 1990. 432 с.
8. Могилевский Э.И. Фракталы на Солнце: монография. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2001. 152 с.
9. Федер Е. Фракталы / пер. с англ. Ю.А. Данилова, А. Шукурова. М.: Мир, 1991. 254 с.
10. Кроновер Р.М. Фракталы и хаос в динамических системах. Основы теории: учеб. пособие / пер. с англ. Т.Э. Кренкеля, А.Л. Соловейчика; под ред. Т.Э. Кренкеля. М.: Постмаркет, 2000. 350 с.
11. Горяинов П.М. О структурно-энергической эволюции континентальной коры и некоторых металлогенических следствиях // Доклады Академии наук СССР. 1986. Т. 287. № 6. С. 1446–1451.
12. Иванюк Г.Ю., Горяинов П.М., Егоров Д.Г. Введение в нелинейную геологию. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 1996. 200 с.
13. Дмитриевский А.Н., Володин И.А., Шипов Г.И. Энергоструктура Земли и геодинамика. М.: Наука, 1993. 54 с.
14. Боганик Н.С. К познанию закономерностей развития земной коры и геотермальных полей стратисферы. М.: Наука, 1972. 84 с.
15. Бунин Г.Г. О ранговых уровнях самоорганизации эндогенных кольцевых образований в структуре литосферы в связи с геотектонической периодичностью Земли // Геологические основы прогнозирования и поисков полезных ископаемых Дагестана. Махачкала: Изд-во Дагест. фил. АН СССР, 1985. С. 66–83.
16. Филонюк В.А. Фундаментальные закономерности многоуровневого структурообразования в геологической среде // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2001. № 10. С. 68–75.
17. Бунин Г.Г. Рудно-магматическая зональность и автоволновый процесс // Гидрогеология и гидрогеохимия подземных вод Дагестана. Махачкала: Изд-во Дагест. фил. АН СССР, 1984.

С. 147–153.

18. Филонюк В.А. Об автономном и упорядоченном распределении золота в кварцево-жильных зонах // Геология рудных месторождений. 1983. № 1. С. 111–114.

19. Корнаков В.В. Исследование закономерностей структурной организации золотого и уранового оруденения // Известия Сибирского отделения секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. 2010. № 2 (37). С. 193–203.

20. Пучков Л.А, Аюров В.Д. Синергетика горно-геологических процессов. 2-е изд., стереотип. М.: Изд-во МГГУ, 2004. 264 с.

21. Эбелинг В. Образование структур при необратимых процессах.

Введение в теорию диссипативных структур / пер. с нем. А.С. Доброславского; под ред. Ю.Л. Климонтовича. М.: Мир, 1979. 279 с.

22. Шустер Г. Детерминированный хаос. Введение / пер. с англ. Ф.М. Израйлева и др.; под ред. А.В. Гапонова-Грехова, М.И. Рабиновича. М.: Мир, 1988. 240 с.

23. Билибин Ю.А. Основы геологии россыпей. М.: Изд-во АН СССР, 1956. 463 с.

24. Бондаренко Н.Г. Образование, строение и разведка россыпей. М.: Недра, 1975. 56 с.

25. Калинин В.М., Руденко В.В. Геометрия недр: учебник для студ. выс. учеб. завед. Ч. 1. Теоретические основы геометрии недр. Новочеркасск: Изд-во ЮРГПУ (НПИ), 2014. 354 с.

References

1. Snetkov V.I. Development of methods of mineral resources qualimetry under modeling and quantitative evaluation of quality of the source of georesources. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'* [Mining Informational and Analytical Bulletin], 2005, no. 8, 406/08-05 – 04.03.05, 79 p. (In Russian).

2. Snetkov V.I. The concept of reserve forecasting in complex structure fields. *Marksheideriya i nedropol'zovanie* [Surveying and Subsoil Use], 2006, no. 4 (24), pp. 19–24. (In Russian).

3. Snetkov V.I., Tal'gamer B.L., Dement'ev S.A. Nested distribution of diamonds in placers as the main reason for non-confirmation of reserves. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'* [Mining Informational and Analytical Bulletin], 2005, no. 8, 409/08-05 – 05.04.05, 79 p. (In Russian).

4. Filonyuk V.A., Dubovskaya I.A. On some reasons of low efficiency of geological and methodological support of modern prospecting, exploration and

operation technologies in gold industry. *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya seksii nauk o Zemle Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Geologiya, poiski i razvedka rudnykh mestorozhdenii* [Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences, Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Prospecting and Exploration of Ore Deposits], 2016, no. 3 (56), pp. 29–43. (In Russian).

5. Haken H. Advanced synergetics: instability hierarchies of self-organizing systems and devices, Springer, 1983, 371 p. (Russ. ed.: Xaken G. *Sinergetika: ierarkhii neustoichivostei v samoorganizuyushchikhsya sistemakh i ustroistvakh*. Moscow: Mir Publ., 1985, 423 p.).

6. Peitgen H.-O., Richter P.H. The beauty of fractals. Images of complex dynamical systems. Berlin, 1986, 199 p. (Russ. ed.: Patgein Kh.-O., Rikhter P.Kh. *Krasota fraktalov. Obrazy kompleksnykh dinamicheskikh system*. Moscow: Mir Publ., 1993, 176 p.).

7. Gerlovin I.L. *Osnovy edinoi teorii vseh vzaimodeistvii v veshchestve* [Fundamentals of the unified theory of all interactions in matter]. Leningrad: Energoatomizdat Publ., 1990, 432 p. (In Russian).

8. Mogilevskii E.I. *Fraktaly na Solntse* [Fractals on the Sun]. Moscow: FIZMATLIT, 2001, 152 p. (In Russian).

9. Feder J. Fractals. NY, 1988, 221 p. (Russ. ed.: Feder E. *Fraktaly*. Moscow: Mir Publ., 1991, 254 p.).

10. Krownover R.M. Introduction to fractals and chaos. Burlington, 1995, 306 p. (Russ. ed.: Kronover R.M. *Fraktaly i khaos v dinamicheskikh sistemakh*. Moscow: Post-market Publ., 2000, 350 p.).

11. Goryainov P.M. On the structural and energy evolution of the continental crust and some metallogenic consequences. *Doklady Akademii nauk SSSR* [Doklady the USSR Academy of Sciences], 1986, vol. 287, no. № 6, pp. 1446–1451. (In Russian).

12. Ivanyuk G.Yu., Goryainov P.M., Egorov D.G. *Vvedenie v nelineinuyu geologiyu* [Introduction to nonlinear Geology]. Apatity: Kola scientific center of the Russian Academy of Sciences Publ., 1996, 200 p. (In Russian).

13. Dmitrievskii A.N., Volodin I.A., Shipov G.I. *Energostruktura Zemli i geodinamika* [Energy structure of the Earth and geodynamics]. Moscow: Nauka Publ., 1993, 54 p. (In Russian).

14. Boganik N.S. *K poznaniyu zakonov razvitiya zemnoi kory i geotermal'nykh polei stratisfery* [To the knowledge of development laws of the earth's crust and stratispheric geothermal fields]. Moscow: Nauka Publ., 1972, 84 p. (In Russian).

15. Bunin G.G. *O rangovykh urovnyakh samoorganizatsii endogennykh kol'tsevykh obrazovaniy v strukture litosfery v svyazi s geotektonicheskoi periodichnost'yu Zemli* [On ranked levels of endogenous circular formation self-organization in the lithosphere structure due to

tectonic periodicity of the Earth]. *Geologicheskie osnovy prognozirovaniya i poiskov poleznykh iskopaemykh Dagestana* [Geological bases of forecasting and prospecting of mineral resources in Dagestan]. Makhachkala: Dagestan branch of the USSR Academy of Sciences Publ., 1985, pp. 66–83. (In Russian).

16. Filonyuk V.A. Fundamental regularities of multi-layer structure formation in geological environment. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University]. 2001. № 10. S. 68–75. (In Russian).

17. Bunin G.G. *Rudno-magmaticheskaya zonal'nost' i avtovolnovyi protsess* [Ore-magmatic zoning and autowave process]. *Gidro-geologiya i gidrogeokhimiya podzemnykh vod Dagestana* [Hydrogeology and Chemistry of Dagestan Groundwaters]. Makhachkala: Dagestan branch of the USSR Academy of Sciences Publ., 1984, pp. 147–153. (In Russian).

18. Filonyuk V.A. On autonomous and ordered distribution of gold in quartz-vein zones. *Geologiya rudnykh mestorozhdenii* [Geology of Ore Deposits], 1983, no. 1, pp. 111–114. (In Russian).

19. Kornakov V.V. Research of laws of the structural organization of gold and uranium ore. *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya seksii nauk o Zemle Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Geologiya, poiski i razvedka rudnykh mestorozhdenii* [Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences, Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Prospecting and Exploration of Ore Deposits], 2010, no. 2 (37), pp. 193–203. (In Russian).

20. Puchkov L.A., Ayurov V.D. *Sinergetika gornogeologicheskikh protsessov* [Synergetics of geological processes]. Moscow: Moscow State Mining University Publ., 2004, 264 p. (In Russian).

21. Ebeling Von Dr.W. *Strukturbildung bei irreversiblen Prozessen: Eine*

Einführung in die Theorie dissipativer Strukturen. Leipzig, 1976, 257 p. (Russ. ed.: Ebeling V. *Obrazovanie struktur pri neobratimyykh protsessakh. Vvedenie v teoriyu dissipativnykh struktur*. Moscow: Mir Publ., 1979, 279 p.).

22. Schuster H.G. Deterministic Chaos. An Introduction. Weinheim, 1984, 220 p. (Russ. ed.: Shuster G. *Determinirovannyyi khaos. Vvedenie*. Moscow: Mir Publ., 1988, 240 p.).

23. Bilibin Yu.A. *Osnovy geologii rossypei* [The basics of placer geology].

Moscow: USSR Academy of Sciences Publ., 1956, 463 p. (In Russian).

24. Bondarenko N.G. *Obrazovanie, stroenie i razvedka rossypei* [Formation, structure and exploration of placers]. Moscow: Nedra Publ., 1975, 56 p. (In Russian).

25. Kalinchenko V.M., Rudenko V.V. *Geometriya nedr* [Subsoil geometry]. Part 1. *Teoreticheskie osnovy geometrii nedr* [Theoretical bases of subsoil geometry]. Novocherkassk: Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI) Publ., 2014, 354 p. (In Russian).

Критерии авторства

Снетков В.И. написал статью, имеет на нее авторские права и несет ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Snetkov V.I. has written the article, has all author's rights and bears the responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The author declares that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.