

Гипотезы, идеи, дискуссия

УДК: [553.2+553.3/.4]:550.8+551.2/.3:622.8

***ЗАКОНОМЕРНОСТИ СТРУКТУРНОЙ ВЗАИМОСВЯЗИ ПРИРОДНЫХ ПОЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЙ И АНОМАЛЬНЫХ КОНЦЕНТАЦИЙ РУДНОГО ВЕЩЕСТВА В ПРЕДЕЛАХ ЗОЛОТОРУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ**

В.А. Филонюк¹, В.В. Корнаков², Е.Л. Сосновская³, Л.И. Сосновский⁴

¹⁻⁴Иркутский государственный технический университет, 664074, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

Рассмотрены взаимосвязи полей распределения рудного вещества и полей интенсивного проявления разрывных нарушений в приповерхностных горизонтах на ряде золоторудных месторождений.

Исследование проведено на детально разведанных и эксплуатируемых месторождениях путем выявления и пространственного сопоставления этих полей в форматах фрактальных кластеров. Показано, что пространственная взаимосвязь подчиняется принципу синергизма. Предполагается, что фрактальность структурной организации этих полей носит фундаментальный характер.

Полученные результаты открывают возможности выхода на более объективные критерии разномаштабного прогнозирования геомеханического состояния массивов горных пород и распределения оруденения на изучаемых и эксплуатируемых месторождениях полезных ископаемых. Они могут быть использованы в качестве основы для создания адекватных технологий поисково-разведочных работ и эффективных систем управления как качеством добываемых руд, так и геомеханическим состоянием массивов горных пород при эксплуатации месторождений.

Ключевые слова: золоторудные месторождения; поле напряжений в массиве горных пород; рудное вещество; тектоническая самодеструкция горных пород; синергизм (синергия); фрактальный кластер; прогнозирование.

REGULARITIES IN STRUCTURAL RELATIONSHIP OF NATURAL STRESS FIELDS AND ANOMALOUS CONCENTRATIONS OF ORE MATERIAL WITHIN GOLD DEPOSITS

V.A. Filonyuk, V.V. Kornakov, E.L. Sosnovskaya, L.I. Sosnovskiy

Irkutsk State Technical University, 83 Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russia.

The article considers the relationships of ore material distribution fields and the fields of intense fault manifestation in the subsurface horizons on a number of gold deposits.

*Статья печатается в порядке дискуссии (*прим. редакции*).

¹Филонюк Виталий Андреевич, доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры прикладной геологии, тел.: 89148882508, e-mail: filonyuk@istu.irk.ru, filonyuk@hotmail.ru

Filonyuk Vitaly, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Professor of the Applied Geology Department, tel.: 89148882508, e-mail: filonyuk@istu.irk.ru, filonyuk@hotmail.ru

Корнаков Вячеслав Валентинович, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник научно-исследовательской части, тел.: 89086647577, e-mail: kornakov@mail.ru

Kornakov Vyacheslav, Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Senior Researcher of the Research Division, tel.: 89086647577, e-mail: kornakov@mail.ru

Сосновская Елена Леонидовна, кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры разработки месторождений полезных ископаемых, тел.: 89148960317, e-mail: avd8691@yandex.ru

Sosnovskaya Elena, Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Associate Professor of the Department of Mineral Deposit Development, tel.: 89148960317, e-mail: avd8691@yandex.ru

Сосновский Леонид Иннокентьевич, доктор технических наук, профессор кафедры разработки месторождений полезных ископаемых, тел.: 89643578250, e-mail: avd8691@yandex.ru

Sosnovskiy Leonid, Doctor of technical sciences, Professor of the Department of Mineral Deposit Development, tel.: 89643578250, e-mail: avd8691@yandex.ru

The study has been conducted on the proved and producing fields through the identification and spatial mapping of the latter in the formats of fractal clusters. Spatial relationship is shown to follow the principle of synergy, and it is suggested that the fractality of structural organization of these fields is of fundamental character.

The obtained results enable to find more objective criteria for multi-scale forecasting of the geomechanical state of rock massifs and mineralization distribution in the studied and exploited mineral deposits. They can be used as a basis for the creation of appropriate exploration technologies and efficient systems controlling both the quality of mined ores and geomechanical state of rock massifs under field development.

Keywords: gold deposits; stress field in the rock massif; ore material; tectonic self-destruction of rocks; synergism (synergy); fractal cluster; forecasting.

Введение и постановка задач исследований. Многолетние исследования авторов по геоинформационному обеспечению и научному обоснованию эффективной и безопасной технологии разработки золоторудных месторождений показали, что базовыми признаками, определяющими решение этих задач, является, с одной стороны, пространственное распределение рудного вещества, а с другой – геомеханическое состояние массива вмещающих его горных пород.

Детальное изучение этих двух признаков в разведочных и эксплуатационных выработках позволило:

– выявить закономерности распределения рудного вещества и участков с максимально интенсивным проявлением безрудных тектонических нарушений и трещин на разных уровнях структурной организации, начиная от рудного образца до уровня рудного поля в целом;

– создать адекватные многоуровневые модели структурной организации этих признаков подсистем и дать их статистическую характеристику;

– провести их пространственное сопоставление между собой и интерпретировать полученные результаты с позиций самоорганизации геологической среды.

Методика исследований. Проблема контроля оруденения разрывной тектоникой всегда была актуальной в процессе исследовательской и практической деятельности геологов. Наиболее серьезно она рассматривалась на рубеже 60–70-х гг. XX в. на различных конференциях и симпозиумах. Наряду с классическими представлениями в эти

годы появились новые, в определенной мере альтернативные версии образования рудных столбов, в основе которых лежит концепция самоорганизации в неравновесной геологической среде [1, 3, 6, 7].

Дальнейшее развитие этих идей сформировалось в новое научное направление, обозначенное как «синергетика геологических систем» или как «самоорганизация минеральных систем». Появились многочисленные научные публикации, новые методы исследований [1, 3, 9–13].

Идеи самоорганизации при формировании тектонических структур и структурно-вещественных комплексов в геологической среде лежат в основе наших многолетних исследований на золоторудных месторождениях [9–13]. В ходе этих исследований мы убедились, что классические представления о процессе освоения минеральных ресурсов и их геоинформационное обеспечение уже не дают необходимого эффекта.

Для удобства восприятия материала в конце статьи приведен словарь использованных в статье терминов и понятий, соответствующих принятой концептуальной основе. Они взяты из известных источников и адаптированы к предмету наших исследований.

При проведении исследований использованы также соответствующие методологические принципы и методы [4]:

– «принцип абстрагирования» [7] или «принцип элементаризации» [2], предусматривающий разбиение изучаемых геологических систем на монопризнаковые подсистемы, что дает возможность выявить закономерности структурной организации каждого конкрет-

ного признака, получить более определенные и однозначные геометрические параметры упорядоченных пространственных конструкций этих подсистем;

– принципы целостности и иерархичности [7], на основе которых проводится таксономический анализ исходных данных и формируется иерархическая модель в виде метризованного структурного каркаса (фрактального кластера) исследуемой подсистемы. Это достигается путем выделения последовательно входящих друг в друга разномасштабных ее неоднородностей (таксонов) с использованием установленных геометрических характеристик параметров дискретности пространственного размещения неоднородностей;

– принцип наличия представительного объема исходной информации для получения адекватных результатов в исследуемом непрерывном диапазоне иерархических уровней. Данный принцип позволяет исключить влияние вынужденных и часто необоснованных интерполяций и экстраполяций при построении обобщенной модели подсистемы;

– принцип дополнительности, предусматривающий одновременное использование «конкурирующих» подходов при определении мотива порядка в монопризнаковых подсистемах, который может быть проявлен либо в распределении выделенных признаков таксонов (мотив «решетки»), либо разделяющими их дискретными участками пустоты (мотив «пены»), что позволяет сделать более адекватный его выбор.

Методика исследований включает сбор и графоаналитическую обработку разномасштабной геологической информации о характере нарушенности горного массива и о распределении рудного вещества на различных иерархических уровнях. Предполагается, что нарушенность является следствием самодеструкции естественного поля напряжений в приповерхностных условиях. Диапазон масштабов информационного обеспечения по нарушенности

горного массива и по распределению рудного вещества является непрерывным и начинается от образца и продолжается до уровня месторождения или рудного поля как единого целого.

Графоаналитическая обработка исходных данных производится в определенной последовательности. Вначале монопризнаковые планы и карты исследуемой геологической среды разбиваются на элементарные или базовые площадки. Их размеры определяются детальностью изучения пространства распределения признака. Изучаемое пространство последовательно представляется в виде:

– монолитного образца размером в среднем $20 \times 15 \times 10$ см;

– детальной площадки в $2-5$ м² обнаженного массива пород или рудного тела;

– обнаженного участка массива пород в стенке горной выработки или карьера размером десятки и сотни квадратных метров;

– крупномасштабных геологических планов и разрезов (от 1:500 до 1:2000) по участку месторождения;

– геологических карт месторождений в масштабе 1:5000–1:10000 и рудного поля в масштабе 1:10000–1:50000.

На каждой элементарной площадке (или в элементарном объеме) изучаемого пространства вычисляется удельная плотность распределения признака (линейный, площадной или объемный модуль трещиноватости и удельная линейная, площадная или объемная концентрация рудоносных элементов в виде вкрапленников, гнезд, прожилков, жил и т.п.).

Затем полученные данные на основе компьютерной обработки трансформируются в разномасштабные карты (или объемные модели) распределения рудного вещества и удельной тектонической нарушенности массива. Далее по ним разрабатываются обобщенные модели интенсивности проявления рудоносности и деструктивных элементов для горного массива как единого цело-

го. На основе полученных карт формируются обобщенные модели пространственного распределения изучаемых признаков.

На следующем этапе исследований выявляются и анализируются фрактальные свойства этих моделей и их ключевые параметры (фрактальная размерность, метрические характеристики структурных каркасов кластера на различных масштабных срезах пространства, параметры фрактального роста и др.). Эти данные необходимы для генетической интерпретации результатов и разработки технологии разномасштабного прогнозирования рудоносности и геомеханического состояния среды (структурный мотив упорядоченности, разномасштабный шаг дискретности).

Геологическая характеристика объектов исследования. Разномасштабные исследования структурной организации золоторудных месторождений проведены на двух объектах:

– в региональном плане – в пределах Дарасунского рудного поля золото-молибденового пояса Забайкалья;

– в детальном масштабе – на Кыллахском золоторудном месторождении Куларской золоторудной провинции Северной Якутии.

Дарасунское золоторудное месторождение (рис. 1) локализовано в пределах Дарасунской эндогенно-рудной системы. Вмещающая среда представлена в разной степени измененными породами протерозойского и палеозойского возраста (габбро-амфиболиты, габбро-диориты, гранодиориты). Они формируют центральную часть этой системы или «базитовый купол». По его периферии в виде гранитосводовых построек развиты преимущественно кислые и щелочные породы раннего и среднего мезозоя (граниты, граносиениты, гранодиориты). Одной из таких построек – Дарасунской вулканокупольной структурой – контролируется Дарасунское месторождение. В ее ядерной части обнажается «паукообразная» субвулканическая интрузия плагииогра-

нит-порфиров с линейными апофизами, расходящимися в северо-западных румбах по радиальным направлениям, и центральным жерловым аппаратом овального сечения, полость которого заполнена explosивно-брекчиевым материалом. В пределах Дарасунской вулканокупольной структуры традиционно выделяются условные концентрические зоны. Центральное гранитное ядро структуры своей внешней границей контролирует положение пояса рудных жил, имеющего овальную форму. В пределах пояса выделено восемь морфологических типов жил кварц-золото-сульфидной и золото-сульфидной формаций, начиная от достаточно протяженных (магистральных), пересекающих по диагонали всю вулканокупольную постройку, до весьма мелких (по длине) различно ориентированных жил, локализованных в виде дискретных скоплений и локальных жильных систем [4].

Кыллахское золоторудное месторождение – типичный представитель месторождений золото-кварцевой формации, локализующихся в метаморфизованных терригенных и терригенно-карбонатных комплексах пород, как правило, включающих горизонты и пачки углистых филлитовых сланцев, поэтому данная формация известна еще и как «черносланцевая золоторудная формация». Практически все регионы Сибири, где установлен данный формационный тип месторождений (Енисейский кряж, Ленская, Аллах-Юньская, Куларская и др. провинции), имеют сопоставимый набор вмещающих оруденение пород, в котором преобладают метапесчаники, алевролиты, сланцы (в том числе и углистые), туфодиамититы, карбонатные породы. Рудные поля и месторождения данной формации локализуются, как правило, в прогибах синклинорного типа, осложненных разнопорядковыми пликативными и дизъюнктивными деформациями. Рассматриваемый формационный тип представлен малосульфидными

золото кварцевыми жилами и жильными зонами, залегающими субсогласно с толщей вмещающих пород и локализуемыми в форме «продуктивных горизонтов». Последние имеют многофакторную природу, которая различными исследователями трактуется по-разному. Золоторудные кварцевые жилы имеют невыдержанную мощность с вариациями от долей до 5–6 м и более, а их длина колеблется от десятков метров до нескольких километров [4].

Результаты исследований. На Дарасунском рудном поле изучена центральная часть Дарасунского месторождения на площади 16,8 км².

Геологической основой послужила карта поверхности месторождения масштаба 1:10000, полученная в результате

трансформации геологической карты поверхности шахтных полей масштаба 1:2000 (шахты Центральная, Юго-западная), составленной Д.А. Тимофеевским (1959 г.) по материалам кондиционной структурной съемки. Дополнительно проводилась геологическая документация эксплуатационных блоков и отдельных подземных горных выработок в масштабе 1:500 и крупнее, делались специальные фотографии забоев и стенок горных выработок.

Графоаналитическая обработка плана деструктивных элементов и рудных жил на горизонт +335 м Дарасунского месторождения (см. рис. 1)* по вышеописанной методике позволила получить карты распределения

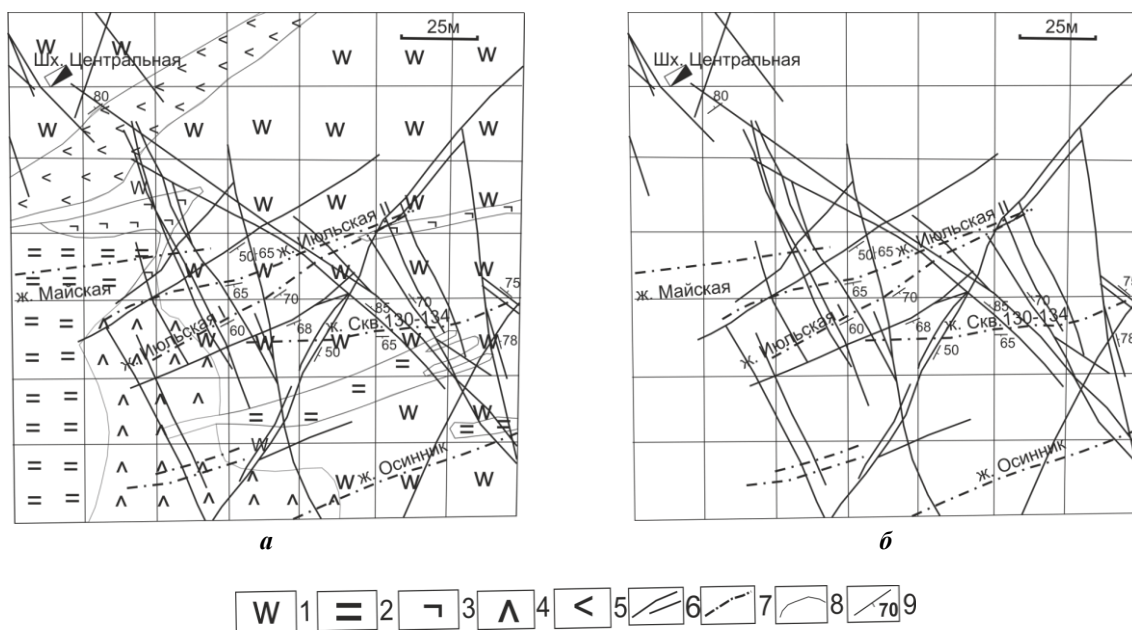


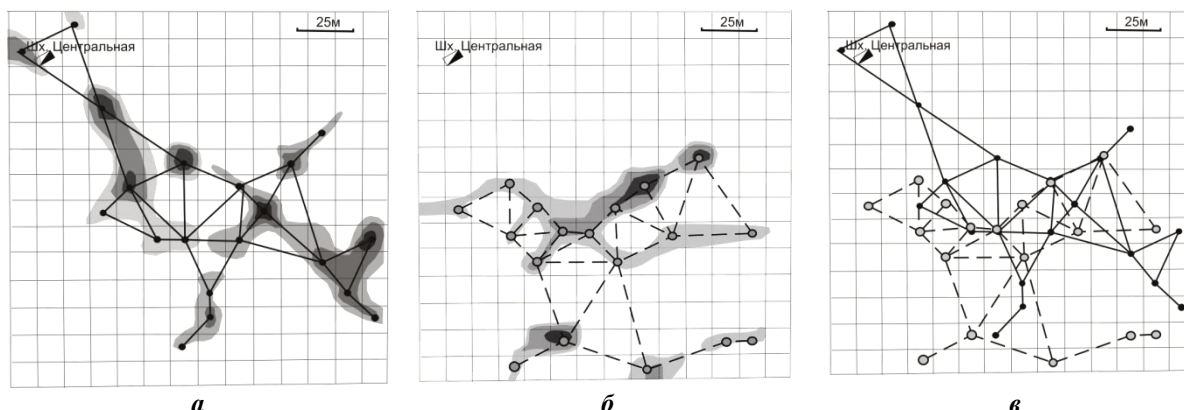
Рис. 1. Фрагмент геологического плана горизонта +335 м по данным эксплуатационной разведки (а) и абстрагированный ее элемент, представленный безрудными тектоническими нарушениями и золоторудными жилами (б). Дарасунское золоторудное месторождение:

1 – амфиболиты; 2 – кварцевые сиениты; 3 – амфиболитизированные габбро; 4 – кварцевые диориты; 5 – габбро-диориты; 6 – безрудные тектонические нарушения; 7 – золоторудные жилы; 8 – границы пород; 9 – элементы залегания

*Судя по приведенным материалам (рис. 1, а, б), авторы относят северо-западные разломы к безрудным, что не соответствует действительности. Как известно, Дарасунское рудное поле локализуется в узле пересечения Жарчихинской и Дарасунской зон разломов северо-восточного и северо-западного простирания. Соответственно, и рудные жилы локализируются как в первой, так и во второй системе разрывных нарушений. Поэтому разломы северо-западного простирания нельзя считать безрудными. Сделанное авторами таким образом «абстрагирование» с искажением фактического материала не может «открывать новые грани в строении геологической среды» и тем более уточнять представления «по ключевым вопросам рудогенеза», как пишут авторы в заключительной части (прим. главного редактора).

удельной концентрации тектонических нарушений, рудных жил (рис. 2) и их пространственных взаимоотношений (рис. 3).

Кроме указанных материалов были получены многочисленные карты поведения этих же признаков в локальных срезах



**Рис. 2. Фрагмент геологического плана горизонта + 335м (см. рис. 1).
Размер базовой ячейки 12,5×12,5 м:**

а – карта интенсивности проявления тектонической нарушенности и структурный каркас контролирующей ее матрицы. Цветом отображена интенсивность соответственно $(20-25) \times 10^4$, $(25-30) \times 10^4$ и $(30-35) \times 10^4$ п.м./м²; *б* – карта интенсивности проявления золоторудных жил и структурный каркас контролирующей их матрицы. Цветом отображена интенсивность $(12-14) \times 10^4$, $(14-16) \times 10^4$ и $(16-18) \times 10^4$ п.м./ м² соответственно; *в* – совмещенная схема структурных матриц, контролирующих положение участков с аномальной концентрацией рудных жил и с аномальной тектонической нарушенностью массива горных пород

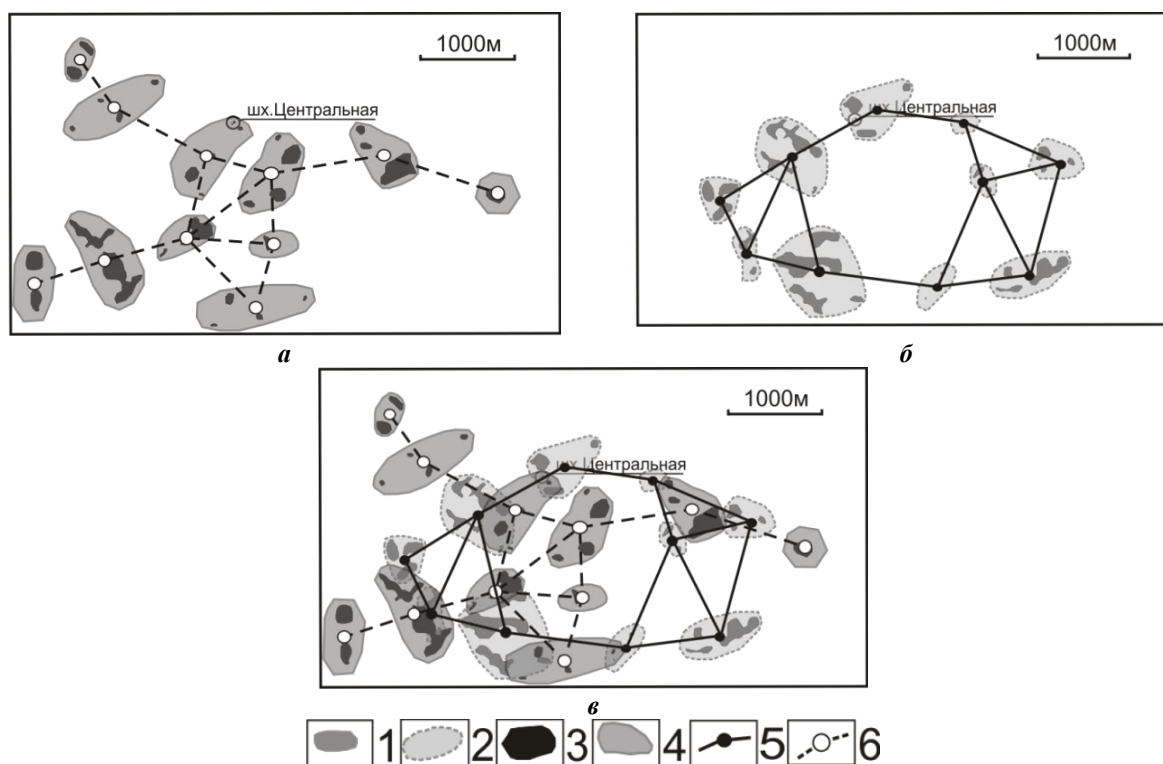


Рис. 3. Карты распределения аномалий интенсивности проявления безрудных тектонических нарушений (а), золоторудных жил (б) и их совмещенный план с выделением элементов кластерной структуры в пределах Дарасунского рудного поля (в).

Размер базовой ячейки 100×100 м:

1, 2 – участки концентрации рудных жил: 1 – таксоны XVI уровня, 2 – таксоны XVII уровня; 3, 4 – участки концентрации безрудных тектонических нарушений: 3 – таксоны XII уровня, 4 – таксоны XIII уровня; 5, 6 – структурные матрицы, контролирующие аномальные скопления: 5 – рудных жил; 6 – участков безрудных тектонических нарушений

породного массива (стенки и забои подземных горных выработок).

Наиболее наглядно взаимное поведение этих признаков в пространстве представлено на материалах аналогичных исследований по Кыллахскому месторождению, где проведены детальные исследования на специальных детализационных площадках и рудных монолитах (масштаб 1:50–1:1).

Здесь мощность рудных тел по сравнению с Дарасунским месторождением больше, что предоставляет возможность получить картину пространственного взаимоотношения изучаемых признаков полей внутри рудных тел.

Ниже приведены совмещенные карты, иллюстрирующие размещение участков с аномальной удельной концентрацией самых мелких тектонических нарушений и трещин и участков аномальных скоплений рудного вещества в виде локальных выделений (мелкие прожилки, вкрапленники, отдельные кристаллические агрегаты) в детальных срезах рудных тел (рис. 4, 5).

Как видно из приведенных материалов, обе исследуемые признаковые подсистемы имеют прерывистое строение в форме многоуровневых пространственно упорядоченных кластеров с хорошо выраженными свойствами самоподобия. Это дает основания для определения их как фрактальных кластеров. Основными параметрами структурной организации, контролирующими про-

странственное размещение неоднородностей изученных признаков на различных иерархических уровнях, являются размеры ребер треугольных ячеек структурных матриц в плоских срезах фрактальных кластеров. Поэтому выявление общих закономерностей структурной организации полей концентрации рудного вещества и деструктивных тектонических элементов проведено путем усреднения и свода в общие таблицы размеров этих ребер в восходящем порядке без пропусков с последующим вычислением масштабных коэффициентов между ними.

Опыт подобных исследований показал, что в идеальном случае трехмерная модель ячейки структурной матрицы фрактального кластера как энергетически обусловленной конструкции на любом масштабном уровне – это тетраэдр. Его грани представлены треугольниками с определенными для конкретного масштаба размерами ребер. Идеальная ситуация, когда треугольники равносторонние, возможна лишь в условиях изотропного развития процессов тектонической самодеструкции и рудогенеза в относительно однородной по физико-механическим свойствам геологической среде. Учитывая неоднородность геологической среды, логично предположить, что в природе такие случаи должны быть довольно редкими, поскольку под влиянием этого фактора структурные матрицы подсистем могут

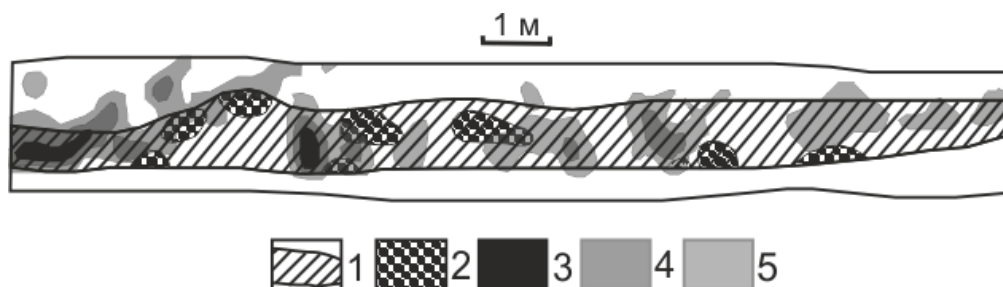


Рис. 4. Совмещенные карты интенсивности проявления безрудной трещиноватости и аномальных скоплений вкрапленников рудной минерализации.

Вертикальный срез золоторудной жилы 1 по юго-восточной стенке штрека.

Размер базовой ячейки 0,4×0,4 м. Золоторудное месторождение Кыллах (Якутия):

1 – выход золото кварцевой жилы в пачке углистых филлитовых сланцев; 2 – скопления вкрапленников рудной минерализации (пирит, халькопирит, галенит, видимое золото и др.); 3–5 – характер интенсивности проявления безрудной трещиноватости (модуль трещиноватости): 3 – >20,0, 4 – (15,0–20,0), 5 – (10,0–15,0) п.м./м² соответственно

приобрести свойства анизотропии. С учетом того, что ориентировка плоскостей срезов, в которых проводится сбор и обобщение информации, по отношению к ориентировке самого кластера может быть различной, то в получаемых эмпирических результатах не всегда можно фиксировать идеальные треугольные ячейки.

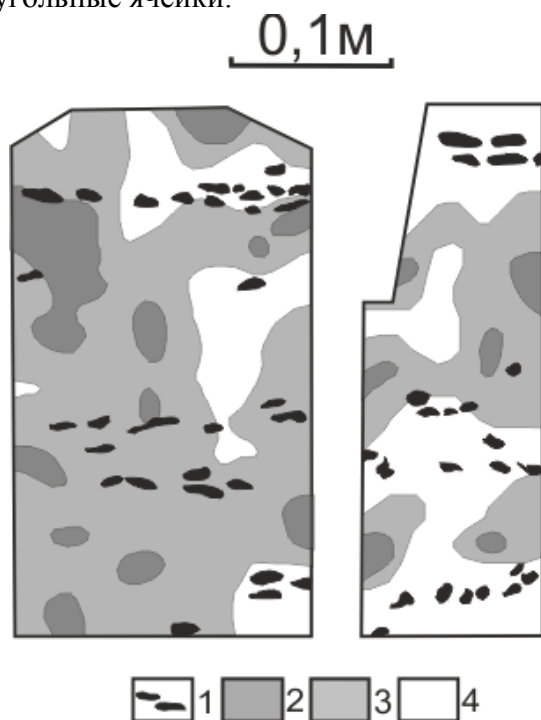


Рис. 5. Совмещенные схемы интенсивности проявления безрудной микротрещиноватости и аномальных скоплений вкрапленников рудной минерализации во взаимно перпендикулярных срезах рудного образца золоторудной жилы № 1 (месторождение Кыллах). Длинная сторона образца ориентирована перпендикулярно зальбандам жилы. Размер базовой ячейки 2,0×2,0 см:

1 – скопления рудной минерализации (пирит, халькопирит, галенит, видимое золото и др.); 2–4 – характер интенсивности безрудной микротрещиноватости (модуль трещиноватости) соответственно: 2 – $>5,0$; 3 – $(1,0-5,0)$; 4 – $<1,0$ п.с.м./см² (или 2 – $>125,0$; 3 – $(25,0-125,0)$; 4 – $<25,0$ п.м./м²)

Однако согласно принятой концепции выявляемая структура является энергетической, т.е. и ее формирование должно быть обусловлено аномальной концентрацией энергии в неустойчивом пространстве. При этом потенциал этой энергии должен существенно превышать возможное влияние неоднородно-

сти среды. Такие структуры классифицируются как диссипативные и обладают свойством упорядоченности, поэтому при выделении таксонов конкретного масштабного уровня мы все-таки придерживались принципа равных расстояний между центрами таксонов подуровня, формирующих данный таксон.

Наш опыт показывает, что, несмотря на некоторую неопределенность в подобном действии, которая генерирует некоторые погрешности в определении границ таксона, при достаточном объеме и качестве информации проводимые исследования позволяют выявить вполне реальную структурную матрицу фрактального кластера, контролирующего пространственное распределение изучаемого признака. Это достигается за счет того, что возможные ошибки при ограничении таксона мало влияют на пространственное положение его центра, поэтому геометрические параметры кластера и его положение в пространстве всегда будут достаточно устойчивыми [8].

В таблице приведены обобщенные эмпирические данные, полученные по результатам исследований на ряде золоторудных месторождений.

График (рис. 6) наглядно иллюстрирует взаимосвязь между размерами ребер уровневых структурных матриц исследуемых признаков подсистем и масштабными коэффициентами, иллюстрирующими динамику фрактального роста выявленных структур этих подсистем.

Как видно из таблицы и графика, средние размеры ребер структурных матриц в обеих подсистемах в основном статистически устойчивы (ошибка усреднения рассчитана с вероятностью 95,0%), а величины масштабных коэффициентов колеблются около значения 2,0 (принцип удвоения). При этом для подсистемы тектонических элементов улавливается слабо выраженный тренд масштабного коэффициента в сторону его ухода в область ниже значения 2,0 по мере фрактального расширения

Усредненные эмпирические значения параметров структурной организации поля распределения скоплений рудного вещества и безрудных тектонических элементов (тектонических нарушений, трещин) в массивах горных пород различных золоторудных месторождений (Дарасунское, Зун-Холбинское, Каллахское и др.)

Иерархия масштабных уровней	Рудные тела (жилы)		Безрудные тектонические элементы (трещины, тектонические нарушения)	
	Ребро ячейки структурной матрицы фрактального кластера, м	Масштабный коэффициент K_c	Ребро ячейки структурной матрицы фрактального кластера, м	Масштабный коэффициент K_c
I	0,03±0,01	2,0	0,03±0,003	2,5
II	0,06±0,02	2,3	0,08±0,014	2,6
III	0,14±0,04	1,6	0,20±0,03	2,5
IV	0,22±0,03	2,6	0,50±0,1	2,2
V	0,58±0,07	1,9	1,1±0,2	2,3
VI	1,1±0,1	1,8	2,5±0,5	3,7
VII	2,0±0,2	1,9	9,0±0,8	2,2
VIII	3,7±0,8	2,2	20,0±3,0	2,1
IX	8,3±1,5	1,6	42,0±6,0	2,2
X	13,4±2,2	1,5	92,0±8,0	2,4
XI	20,3±5,4	2,6	221,0±10,0	1,6
XII	34,0±6,0	2,3	353,0±12,0	2,3
XIII	79±10	1,6	800,0±45,0	2,6
XIV	122±17	1,9	2040±480	–
XV	233±35	1,6	–	–
XVI	381±48	1,6	–	–
XVII	629±84	1,7	–	–
XVIII	1088±133	1,4	–	–
XIX	1583±140	1,5	–	–
XX	2400±225	–	–	–

**Масштабный коэффициент K_c – отношение средней величины ребра ячейки структурной матрицы фрактального кластера высшего уровня к средней величине ребра ячейки матрицы кластера предыдущего уровня (см. приложение) (прим. автора).

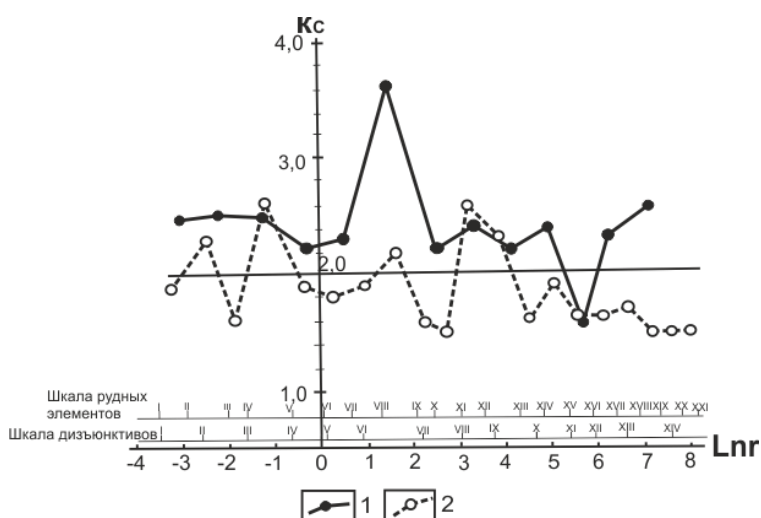


Рис. 6. График изменения величин масштабных коэффициентов K_c , отображающий динамику фрактального роста в подсистемах тектонических нарушений (1) и золоторудных жил (2) в пределах Дарасунского рудного поля. Римскими цифрами обозначены иерархические уровни структурной организации исследуемых подсистем

подсистемы. Это свидетельствует о повышении степени ее устойчивости, как единого целого. Для подсистемы рудных жил такого тренда не улавливается, и значения масштабных коэффициентов на всех иерархических уровнях стремятся в область выше значения 2,0, что говорит о меньшей степени ее устойчивости по сравнению с подсистемой тектонических элементов.

Для проведения сравнительного анализа была рассчитана фрактальная размерность выявленных структурных каркасов исследованных признаков подсистем. Расчет проведен путем графоаналитической обработки данных по поверхности Дарасунского месторождения (см. рис. 3), полученных путем покрытия карт интенсивности насыщения пространства безрудными тектоническими нарушениями и трещинами, а также рудными жилами, элементарными ячейками квадратной формы с последовательно увеличивающейся площадью от 50×50 м до 1000×1000 м. Построенные графики в билигарифмической системе координат отображают характер изменения соотношений непустых ячеек к общему их количеству при покрытии площади ячейками определенного размера (рис. 7). Как видно, обе подсистемы обладают практически одной фрактальной размерностью, дробная часть которой определяется как тангенс общего угла наклона графиков, равного 37° . Таким образом, величина фрактальной размерности подсистем безрудных тектонических элементов и рудных жил составляет $1,753 \pm 0,035$.

Обсуждение результатов. Приведенные выше результаты исследований показывают следующее:

- на всех иерархических уровнях подсистемы распределения удельной плотности элементов безрудной тектоники, маркирующей структуру и интенсивность разгруженного естественного поля напряжений в породном массиве, и рудоносных тел имеют дискретный и вместе с тем упорядоченный характер с выраженным свойством самоподобия и

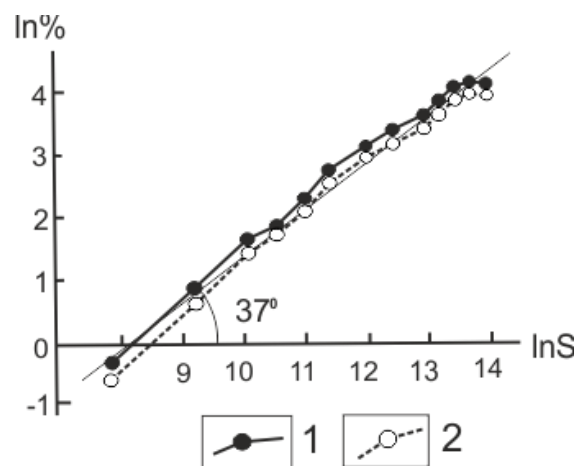


Рис. 7. График, отображающий фрактальные размерности для подсистем золоторудных жил (1) и безрудных тектонических нарушений (2), составленный на основе анализа карт распределения аномальных участков проявления этих признаков на площади Дарасунского рудного поля. Расчеты проведены в границах аномалий с интенсивностью более 20×10^{-4} п.м./м² (см. рис. 3)

представляют собой фрактальные кластеры, т.е. диссипативные структуры;

- геометрические параметры фрактальных кластеров изученных подсистем статистически устойчивы, что дает основание предположить реальное существование выявленных структур этих подсистем в природе;

- геометрические параметры структурных матриц кластеров изучаемых признаков подсистем и их фрактальные размерности очень близки;

- иерархия масштабов уровней организации выявленных кластеров в среднем подчиняется принципу удвоения, при этом коэффициент масштабного подобия изменяется в ту и другую сторону и этим отображает конкретные для объекта показатели фрактального роста кластерной структуры в определенном диапазоне ее масштабных уровней;

- в поведении графиков изменения масштабных коэффициентов отмечается слабо выраженная тенденция совпадения роста скоростей расширения на определенных интервалах значений размеров ребер структурных матриц

сравниваемых подсистем, несмотря на разное количество выявленных иерархических уровней в той и другой подсистемах;

– пространственное взаимоотношение структурных каркасов фрактальных кластеров сравниваемых признаков подсистем подчинено принципу синергизма, выраженному в том, что они не экранируют (не унаследуют) друг друга, а сопрягаются в пространстве таким образом, что центры узлов каркасов одного признака находятся в межузловом пространстве каркаса другого признака. Более подробно данная ситуация обсуждалась нами ранее [11].

Все изложенное дает основание предположить наличие структурной и энергетической связи между двумя изученными подсистемами, которая является следствием их формирования в режиме самоорганизации в условиях термодинамической неустойчивости геологической среды как единого целого. Это означает, что естественное саморазрушение напряженного массива горных пород в форме спонтанно формирующейся фрактальной структуры поля деструктивных элементов является средством эффективного самоподдержания состояния «текущего равновесия» [14] при любых естественных пространственно-временных изменениях геомеханических условий геологической среды.

Универсальный характер структурной организации полей тектонической самодеструкции в приповерхностных частях массивов горных пород (а следовательно, и полей напряжений), полей размещения рудного вещества и подчинение пространственного взаиморасположения этих подсистем принципу синергизма позволяют предполагать их энергетическую взаимосвязь. В неустойчивом пространстве геологической среды свободная энергия саморазрушения (разуплотнения) напряженного породного массива могла быть «перепакована» в режиме самоструктурирования в потенциальную форму энергии

в виде подсистемы более плотного вещества (рудного вещества). В этом, очевидно, кроется основная причина явления синергизма в нашем конкретном случае. За счет синергизма поддерживается текущее равновесие в неравновесной геологической среде. Механизм такого рода структурно-вещественных преобразований практически не изучен, и корректно объяснить его на основе классических представлений о рудогенезе невозможно. Поскольку описанные факты зафиксированы практически на всех изученных нами золоторудных месторождениях, есть основания предполагать, что мы имеем дело с закономерностями, имеющими фундаментальный характер. Поэтому данный вопрос заслуживает пристального внимания и дальнейшего более углубленного изучения.

Заключение. Выполненные в рамках поставленных задач исследования, с нашей точки зрения, достигли поставленной цели и их результаты имеют определенную научную и практическую значимость.

В общенаучном плане это, прежде всего, положительный опыт изучения латентных подсистем геологической среды в широком диапазоне масштабов их структурной организации в условиях использования более современной концептуальной основы и достаточного обеспечения исходной информацией для получения достоверных результатов. Сами результаты открывают новые грани в строении геологической среды (фрактальность, синергизм и т.п.) и одновременно предопределяют необходимость уточнения существующих представлений по ключевым вопросам проблемы рудогенеза.

В прикладном плане полученные эмпирические результаты (как открытые факты) могут быть использованы по крайней мере в двух направлениях.

Во-первых, они могут служить достаточно конструктивной основой для более эффективного разномасштабного прогнозирования локализации орудене-

ния и геомеханического состояния массива вмещающих горных пород в условиях их упорядоченной дискретности. Это может быть выполнено на основе использования принципа структурной гомологии, обусловленного феноменом фрактальности структурного каркаса признаков подсистем.

Во-вторых, при необходимости специальными расчетами карты удельной тектонической нарушенности или трещиноватости могут быть переведены в палеокарты интенсивности естественных напряжений, которые затем могут быть использованы при компьютерном моделировании конкретных геомеханических ситуаций с учетом существующего или предполагаемого техногенного воздействия на геологическую среду. Только на основе результатов моделирования геомеханического состояния геологической среды с учетом фрактальных свойств поля напряжений может быть произведен выбор наиболее приемлемых технологий горных работ или их вариантов, т.е. соответствующих поставленным требованиям безопасности, экономической и экологической эффективности. К сожалению, каких-либо способов моделирования, адекватно учитывающих установленные свойства поля напряжений в массиве горных пород, авторам пока неизвестно. Ясно одно – их разработка возможна лишь на основе результатов исследований, обсуждаемых в данной статье.

Статья написана на основе результатов исследования по государственному заказу Минобрнауки РФ, гос. бюджетная НИР ГЗ № 5.1849.2011.

Библиографический список

1. Горяинов П.М., Иванюк Г.Ю. Самоорганизация минеральных систем. // Синергетические принципы геологических исследований. М.: ГЕОС, 2001. 312 с.
2. Косыгин Ю.А. Тектоника. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Недра, 1983. 536 с.
3. Летников Ф.А. Синергетика гео-

логических систем. Новосибирск: Наука, 1993. 253 с.

4. Модели рудных районов и месторождений Сибири / Ж.В. Семинский, В.А. Филонюк [и др.]. М.: Недра, 1994. 250 с.

5. Поспелов Г.Л. Парадоксы, геолого-геофизическая сущность и механизмы метасоматоза. Новосибирск: Наука, 1973. 355 с.

6. Проблемы образования рудных столбов: сб. докл. Всесоюз. науч. симпозиума / под ред. А.Ф. Шахова. Новосибирск: Наука, 1972. 436 с.

7. Садовский В.Н. Основания общей теории систем. М.: Мысль, 1974. 279 с.

8. Сосновская Е.Л. Об универсальном характере фрактальных свойств полей локализации рудных жил и элементов естественной деструкции в пределах золоторудных месторождений // Проблемы развития минеральной базы Восточной Сибири: сб. науч. тр. Иркутск: Изд-во ИрГТУ. 2003. С. 221–229.

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

10. Филонюк В.А. Исследование причинной динамики синергетического развития рудогенных процессов // Рудная синергетика. Труды ЦНИГРИ. 1990. Вып. 244. С. 88–100.

11. Филонюк В.А. Структурные признаки саморазвития рудогенных процессов во времени и в пространстве // ДАН СССР. 1983. № 2 (275). С. 442–445.

12. Филонюк В.А. Фундаментальные закономерности многоуровневого структурообразования в геологической среде // Вестник ИрГТУ. 2001. № 10. С. 68–75.

13. Филонюк В.А., Корнаков В.В. Фрактальные кластеры в геологических системах и гипотеза о процессах многоуровневого структурообразования в геологической среде // Известия Сибирского отделения секции наук о Земле РАЕН. Геология, поиски и разведка

рудных месторождений. 2011. № 2 (39). С. 232–248.

14. Эбелинг В. Образование структур при необратимых процессах. М.: Мир, 1979. 279 с.

Приложение. Словарь использованных терминов и понятий

Геологическая среда – это сложная многокомпонентная природная система, имеющая упорядоченную и структурно организованную по принципу самоподобия иерархию по каждой отдельно взятой ее компоненте. Геологическая среда обладает тесным, энергетически обусловленным кооперативным взаимодействием (синергизмом) всех ее компонент, определяющим устойчивость или «текущее равновесие» ее как единого целого.

Диссипативные структуры в геологической среде – это участки диссипации (поглощения) свободной энергии, пространственные границы которых определяются процессами нейтрализации критических энергетических флуктуаций в крайне неустойчивых состояниях геологической среды.

Вероятность возникновения критических состояний, способных инициировать формирование диссипативных структур, возрастает по мере уменьшения объема энергетически возбужденного пространства, т.е. наиболее мощные по удельной концентрации энергии флуктуации могут возникать лишь в малых по объему пространствах.

Коэффициент масштабного подобия (скейлинговый коэффициент) – величина, характеризующая отношение геометрических параметров структурных матриц, контролирующих пространственное размещение таксонов в смежных иерархических уровнях подсистемы.

Самоподобие (масштабное подобие, скейлинг) – повторение мотива порядка строения «целого» в его элементах.

Синергизм в геологической среде – совместное (кооперативное) поведение или взаимодействие монопризнаковых подсистем как составных компонент единой геологической системы, которое может быть выявлено при совмещении одномасштабных карт (или структурных каркасов) аномального поведения этих признаков в единой системе координат. Синергизм проявляется в том, что структурные каркасы подсистем не экранируют друг друга, а сопрягаются в пространстве таким образом, что центры узлов каркасов одного признака находятся в градиентных зонах узлов каркаса другого признака. Свойство синергизма является одним из ключевых структурных признаков режима самоорганизации в формировании геологических систем.

Таксон – пространственно обособленное скопление дискретных элементов (неоднородностей) определенного масштаба, расположенных примерно на одинаковом расстоянии друг от друга, представляющее элемент неоднородности последующего масштабного уровня монопризнаковой подсистемы. Например, в золоторудных месторождениях таксоны представлены ограниченными в пространстве скоплениями участков с повышенной интенсивностью трещиноватости и участков с аномальной концентрацией рудного вещества.

Таксономический анализ – выделение в пространстве последовательно входящих друг в друга, т.е. иерархически взаимосвязанных, разномасштабных таксонов в монопризнаковой подсистеме.

Текущее равновесие – это равновесное состояние открытых систем, находящихся в неравновесных термодинамических условиях, поддерживаемое за счет притока свободной энергии и вещества извне.

Фрактальная размерность – мера того, насколько фрактальный объект заполняет занимаемое им целочисленное (одно-, дву- и трехмерное) пространство. Она выражается дробным

числом, где дробная часть (число после запятой) определяется как значение тангенса угла наклона графика изменения логарифмических значений процентного соотношения непустых элементарных ячеек к общему их количеству относительно логарифмических значений размеров этих ячеек при покрытии ими исследуемого пространства. Соответственно, для линии, плоскости и объема одна и та же фрактальная размерность будет выражаться величинами 0,327; 1,327; 2,327.

Фрактальная структура (фрактальный кластер) – метризованный структурный каркас, отображающий по принципу самоподобия последовательное вхождение друг в друга разномасштабных дискретных таксонов в пространстве локализации монопризнаковой подсистемы.

Фрактальность – свойство самоподобной структурной организации последовательно входящих друг в друга разномасштабных элементов монопризнаковой подсистемы внутри целочисленномерных пространств (т.е. внутри одно-, дву- и трехмерного пространства).

Фрактальный рост – расширение фрактальной структуры, маркируемое последовательностью скейлинговых коэффициентов, отображающих численно выраженные отношения геометрических параметров структуры (структурной матрицы), контролирующей пространственное положение таксонов смежных иерархических уровней в монопризнаковой подсистеме. Последовательное изменение коэффициентов вдоль иерархической оси отображает динамический режим фрактального роста структуры подсистемы.

Рецензент доктор геолого-минералогических наук, профессор Иркутского государственного технического университета А.П. Кочнев