

Кольского полуострова с наличием дополнительных экспортных возможностей.

Максимальный спрос в России на ниобиевую продукцию к 2020 г. может составить до 20 тыс. т Nb_2O_5 (реально не более 5 тыс. т), в т.ч. до 18 тыс. т в виде феррониобия и до 2 тыс. т в виде Nb_2O_5 . Последний большей частью может быть покрыт продукцией сырьевых объектов СЗФО. Такая же ситуация с цирконием: потребность в диоксиде и других соединениях циркония и в чистом металле может быть полностью удовлетворена за счет получения их из эвдиалитового концентрата месторождения Аллуайв. Потребность в литии (до 3,5 тыс. т Li_2O к 2020 г.) наполовину покрывается за счет освоения Колмозерского месторождения.

В заключение можно наметить первоочередные задачи по доизучению и геолого-экономической переоценке редкометалльных месторождений Северо-Запада России:

1. Ловозерское месторождение многие годы было и остается флагманом отечественной редкометалльной промышленности. Для сохранения этого статуса необходима геолого-экономическая переоценка всего месторождения, включающая все участки развития лопаритовых, лопарит-эвдиалитовых и эвдиалитовых руд: Карнасурт, Умбозеро, Кедыквырпахк, Аллуайв (включая Сенгийок), Сенгисчорр, Ангвундасчорр и др. Вместе с тем, учитывая, что часть запасов месторождения (~19 %) находится в распределенном фонде (отдельные горизонты участков Карнасурт и Кедыквырпахк) в первую очередь необходимо переоценить эвдиалитовые и эвдиалит-лопаритовые руды участка Аллуайв, разработать ТЭО разведочных кондиций для подсчета запасов и утвердить их в ГКЗ. В новых кондициях в число параметров следует дополнительно включить: «подсчитать запасы ZrO_2 , TR_2O_3 , Ta_2O_5 и Nb_2O_5 в эвдиалитах».

2. Месторождение Африканда перовскит-титаномагнетитовых руд (Ti, TR, Nb, Ta) детально разведано в 1950-х годах, но в 1970-х было снято с баланса. Необходимо его переоценка, разработка разведочных кондиций, подсчет и утверждение запасов. Только после этого можно будет приступить к проектированию его освоения.

3. Разведанные комплексные редкометалльные пегматиты — Полмостундровское (Nb, Ta, Be, Li) и Колмозерское (Ta, Nb, Be, Li), Вороньтундровское (Ta, Be, Cs) — также нуждаются в геолого-экономической переоценке, т.к. их запасы были утверждены более 40–50 лет тому назад.

4. Хибинские нефелин-апатитовые месторождения могут стать крупнейшим производителем редких земель (в т.ч. иттриевой группы), стронция (из апатитовых концентратов), титана и ниобия (из сфеновых), галлия, рубидия и цезия (из нефелиновых). Большинство месторождений редких металлов — комплексные. Так, при извлечении редких земель из апатитовых концентратов будет извлекаться и стронций (в 3 раза больше, чем TR). Проблема его реализации весьма актуальна.

5. Важнейшая задача — маркетинг всей гаммы выпускаемой продукции комплексных месторождений, а так как реальная потребность в редких металлах

в РФ, к сожалению, отсутствует, эта задача становится трудновыполнимой.

Таким образом, следует еще раз подтвердить мнение Правительства Мурманской области и специалистов Кольского научного центра РАН о целесообразности создания центра редкометалльной промышленности в Мурманской области, располагающей достаточной минерально-сырьевой базой редких и в первую очередь редкоземельных металлов, развитой транспортной и энергетической инфраструктурой, высококвалифицированными научными и производственными кадрами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Архангельская В.В., Лагонский Н.Н., Усова Т.Ю., Чистов Л.Б. Руды редкоземельных металлов России // Минеральное сырье. Серия геолого-экономическая. — М.: ВИМС, 2006. — № 19. — С. 72.
2. Быховский Л.З., Ануфриева С.И., Орлова Н.И. Современное состояние комплексной изученности и использования попутных компонентов Хибинских апатитовых месторождений / Горнодобывающая промышленность Баренцева Евро-Арктического региона: взгляд в будущее: Сб. докладов II Междунар. конф. — Мурманск, 2013. — С. 31–32.
3. Быховский Л.З., Кудрин В.С., Тигунов Л.П. и др. Нетрадиционные источники получения титана и редких металлов. — М., 2003.
4. Государственный доклад о состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2012 г. / Под ред. Д.Г. Храмова. — М.: Центр «Минерал» — ФГУНП «Аэрогеология», 2013. — С. 346.
5. Карпузов А.Ф., Лебедев А.В., Житников В.А., Коровкин В.А. Минерально-сырьевая база твердых полезных ископаемых // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. — М., 2008. — С. 66–80.
6. Кременецкий А.А., Архипова Н.А., Усова Т.Ю. Редкие металлы России: минерально-сырьевая база, освоение, производство, потребление / Литий России: минерально-сырьевые ресурсы, инновационные технологии, экологическая безопасность: Матер. Всерос. науч.-практ. совещ. с международным участием. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2011. — С. 61–64.
7. Машковцев Г.А., Быховский Л.З. Редкие земли в комплексных месторождениях твердых полезных ископаемых / Редкоземельные элементы: геология, химия, производство и применение: Тез. Междунар. конф. РЕЕ-2012. — М., 2012. — С. 105–106.
8. Машковцев Г.А., Быховский Л.З., Рогожин А.А., Темнов А.В. Перспективы рационального освоения комплексных тантал-ниобий-редкоземельных месторождений России // Разведка и охрана недр. — 2011. — № 6. — С. 9–12.
9. Николаев А.И. Перспективы использования Африкандского месторождения перовскитовых руд как сырьевой базы для обеспечения отечественной промышленности стратегическими материалами, содержащими титан и редкие металлы // Север промышленный. — 2007. — № 8. — С. 62–64.

© Быховский Л.З., Пикалова В.С., 2015

Быховский Лев Залманович // lev@vims-geo.ru
Пикалова Варвара Сергеевна // pikalova@vims-geo.ru

УДК 550.839

Мезенцева А.Е. (ООО «ВНИИ-1»)

ФАЗОВО-СТРУКТУРНЫЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ ЧИСЛОВЫХ МОДЕЛЕЙ РУДНЫХ ОБЪЕКТОВ С ЦЕЛЬЮ ЛОКАЛЬНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ

Статья посвящена проблеме локального прогнозирования оруденения, возможности ее решения в сфере нелинейной динамики фазового и геометрического пространств числовых переменных. Исследованы месторождения золота и серебра Северо-Востока РФ посредством метода фазовых траекторий, адаптированного к геологическим задачам, в системе «поляризуемость — магнитная

восприимчивость» пород. Сделан вывод о существовании для месторождений золота и серебра, независимо от их рудно-формационной принадлежности, общих критериев нелинейного характера, обнаруживаемых фазово-структурным методом по числовым характеристикам пород. **Ключевые слова:** физические свойства, фазово-структурный метод, прогнозирование, месторождения золота и серебра.

Mezentseva A.E. (VNII-1)

PHASE AND STRUCTURAL RESEARCH METHOD OF NUMERICAL MODELS FOR ORE OBJECTS AIMED AT THE LOCAL FORECAST

*The article is dedicated to the problem of local mineralization forecast, as well the possibility to solve it in the field of nonlinear dynamics of phase and geometrical spaces of numeric variables. Gold and silver deposits in the North-East of the Russian Federation have been studied through the method of phase trajectories adapted to geological challenges in the system «polarizability-magnetic susceptibility» of rocks. The conclusion of the availability of gold and silver deposits, regardless of their ore formation has been drawn, the common criteria for non-linear nature of the deposits identified through the phase and structural method by the numerical characteristics of the species has been found. **Key words:** physical properties, phase and structural method, forecast, gold and silver deposits.*

Локальное прогнозирование как технология имеет в своем арсенале преимущественно вещественные признаки, систематизированные на основе формационной и генетической принадлежности оруденения. Выделяют минеральные типы месторождений, типы руд, минеральные и геохимические ассоциации и более детальные характеристики этого рода. В данной статье описывается опыт локального прогнозирования оруденения с позиций и средствами нелинейной динамики с использованием физических свойств горных пород.

В качестве наиболее представительных месторождений-эталонов для исследования были выбраны три промышленных объекта: I — Майское месторождение золото-(мышьяковисто)-сульфидной вкрапленной базовой рудной формации [1, 3, 7] в терригенно-осадочных толщах триаса, локализованное в периферийной части одной из интрузивно-купольных структур перивулканической зоны Охотско-Чукотского вулканического пояса (ОЧВП); II — месторождение серебра Дукат золото-серебряной базовой рудной формации [2, 3] в меловых вулканитах, приуроченное к интрузивно-купольной структуре в пределах рифтогенной вулcano-тектонической депрессии ОЧВП; III — месторождение Кубака золото-серебряной формации [3, 9] в вулканитах средне-позднедевонского возраста, размещающееся на периферии вулканоструктуры, находящейся в краевой части Омолонского срединного массива.

На этих месторождениях в процессе тематических работ под руководством автора было проведено опробование по сети скважин, канав и подземных горных выработок и лабораторно измерены физические свойства горных пород. Описание исходной информации и

первичной обработки данных изложены ранее [5, 6]. Регуляризованный массив осредненных значений каждой из физических переменных представлен в изолиниях серий вертикальных разрезов и погоризонтных планов по месторождениям в масштабе 1:10 000.

Наиболее доступным и адекватным по возможности изучения геометрического и фазового пространств числовых характеристик месторождений является метод фазовых траекторий, впервые апробированный на геологических задачах и охарактеризованный в публикациях [4, 5, 6].

На основе разрезов и планов изолиний двух физических свойств пород — магнитной восприимчивости и поляризуемости — фазово-структурным методом предполагалось решить следующие задачи:

1) исследовать безрудные области на флангах месторождений, которые могут оказаться (в фазовом и геометрическом пространствах) структурно более простыми относительно оруденелых пород;

2) изучить пограничные области между безрудными флангами и оруденелой частью месторождений, определить фазовые критерии для оконтуривания месторождений (облака регрессии значений магнитной восприимчивости и поляризуемости в оруденелой части месторождений обладают высокой дисперсией, т.е. динамической хаотичностью; фазовые структуры, очевидно, не сразу становятся динамически хаотичными средами, проследить этот переход со стороны безрудных флангов чрезвычайно важно);

3) в центральных частях месторождений выявить фазово-структурные особенности рудовмещающих метасоматов (прямая задача прогнозирования) и путем их геометризации осуществить локальное прогнозирование рудных тел (обратная задача прогнозирования).

Отметим, что магнитная и электрическая переменные хорошо пространственно дифференцированы и по конфигурации изолиний отвечают залеганию рудных тел пологого и крутого падения [6]. В *поляризуемости* пород присутствует эффект *электрохимической активности* минералов и жидкой среды, как известно, влияющей на химизм процессов минералообразования. Носителем *магнитной восприимчивости* на месторождениях является пирротин, имеющий, наряду с другими сульфидами, гидротермальное и контактово-метасоматическое происхождение.

Основные особенности фазово-структурного метода исследования числовых моделей геологических объектов

Используемый *метод фазовых траекторий* основан на понятии фазового пространства, сущность метода изложена во многих справочных источниках физико-математического направления. Пусть система описывается дифференциальным уравнением n -го порядка. Ее состояние может быть задано n числами, определяющими координаты некоторой точки в n -мерном пространстве, причем каждой точке этого пространства будет соответствовать одно определенное состояние (определенная фаза) системы. Поэтому такое пространство называется *фазовым*. Для систем, описываемых дифференциальным уравнением второго порядка, фазовое пространства является двумерным, и в этом случае оно превращается в фазовую плоскость, на ко-

торой по двум осям координат (X , Y) откладываются какие-либо две переменные, характеризующие поведение данной системы в динамике (в переходном процессе). В качестве таких переменных чаще всего используется отклонение регулируемой величины X (откладывается по оси X) и первая ее производная X' , т.е. скорость изменения такого отклонения (откладывается по оси Y). В случае колебательного процесса с постоянной амплитудой и частотой, когда корни характеристического уравнения являются чисто мнимыми, изображение на фазовой плоскости будет представлять собой замкнутый контур — замкнутую фазовую траекторию, в частности, в виде эллипса. Каждому периоду колебаний соответствует прохождение изображающей точкой всего контура. В случае затухающего колебательного процесса (корни характеристического уравнения имеют отрицательную вещественную часть) изображение на фазовой плоскости будет иметь вид сходящейся к началу координат (или к определенному установившемуся значению при наличии внешнего возмущения) спиралевидной фазовой траектории и расходящейся — при расходящемся колебательном процессе (корни с положительной вещественной частью, система неустойчива).

Фазовые траектории представляют собой графическое отражение процессов динамики в системе. В это отражение входят лишь координаты по числовым осям переменных, и отсутствует время, а в нашем случае отсутствует (геологическое) пространство. Единство пространства—времени в данном случае наглядно проявлено, так как геологическое пространство в определенном смысле эквивалентно времени.

Действительно, пространство, в котором происходит осадконакопление, с течением времени все больше становится заполненным породами, геологической субстанцией, в этом смысле геологическое пространство эквивалентно времени. Этот тезис можно иллюстрировать, например, геологическим законом Стено: «Нормальное залегание слоев горизонтальное, причем слои, ограничивающие слои снизу и сбоку, образованы ранее» (Геологический словарь, 1966).

Фазовая траектория сама по себе дает лишь качественное представление о характере поведения системы. Чтобы получить количественное положение изображающей точки в любой момент времени, нужно найти тем или иным способом решение переходного процесса во времени (у нас решение представлено в виде изолиний значений рассматриваемых переменных).

Наша задача — исследовать поведение выбранных переменных по фазовым траекториям и, разделив все их многообразие по типам, дифференцировать петрофизическое пространство. Знание переходного процесса означает знание типов фазовых траекторий (законов поведения переменных) и определение на планах и разрезах границ распространения этих типов траекторий (границ областей действия законов).

Метод фазовых траекторий в физическом и математическом смысле предполагает рассмотрение переменной и ее производной. Переменные в геофизике (и геохимии) могут удовлетворять этим условиям, а могут и не удовлетворять. Возможны такие обстоятельства,

что в одной части геологического (в частности, петрофизического) пространства они соотносятся как одноранговые переменные, а в другой — как переменная и производная, а в каких-то местах могут по значимости меняться местами. Определенно только то, что местоорождения — системы, отличающиеся более высокой степенью организации, чем окружающая геологическая среда, и характер структурной сложности должен, так или иначе, выразиться в фазовых траекториях выбранных переменных.

Рассмотрим на примере золото-серебряного местоорождения Кубака соотношение фазового и геометрического пространств двух переменных — магнитной восприимчивости и электрической поляризуемости пород — и методику построения фазовых траекторий. Геологическое описание этого и двух других исследуемых рудных объектов приведено в публикации автора о физических характеристиках околорудных метасоматитов [6], а наиболее полно — в работах [1–3, 9].

Геометрическое пространство двух физических переменных. Рисунок изолиний поляризуемости η и магнитной восприимчивости α на месторождении (рис. 1Б, В) свидетельствует о том, что эти два свойства в области рудной зоны Центральной находятся в противофазе, при этом наблюдается совпадение конфигураций изолиний с субвертикальным размещением гидротермально-метасоматических пород в окрестности рудной зоны. Однако детали, которые могли бы служить признаками оруденения, явно не выражены. На флангах, за пределами рудоносной части месторождения, физические свойства коррелируются друг с другом и в целом согласуются с пологом залеганием пород.

Рассмотрим более детально области разных взаимозависимостей переменных с помощью фазовых траекторий. На рис. 1Б, В показаны направления фазовых траекторий для исследования перехода пологих структур безрудных флангов на крутопадающие структуры месторождения.

Обозначим интервалы между изолиниями на разрезе магнитной восприимчивости буквами a, b, c, d, \dots , а поляризуемости — цифрами $1, 2, 3, 4, \dots$ — в порядке возрастания значений. Если наложить изолинии одной переменной на изолинии другой, обеспечив точную привязку, мы получим двумерное геометрическое распределение этих переменных в плоскости данного разреза. На фрагменте левой половины разреза (рис. 2А) можно видеть заключенные между изолиниями ячейки, каждая из которых имеет теперь двойной индекс, состоящий из цифры и буквы.

Фазовое пространство двух переменных. Составим координатную плоскость в системе «магнитная восприимчивость — электрическая поляризуемость», т.е. двумерное фазовое пространство $\eta - \alpha$ (рис. 2В). По оси X отметим значения магнитной восприимчивости α с интервалом, равным сечению изолиний этой переменной на разрезе. Тогда интервалы от минимума до максимума всего диапазона встречающихся значений аналогично разрезу обозначим рядом букв: $a, b, c, d, e, f, g, h, \dots$ (и т. д.) в порядке возрастания значений. По оси Y отметим значения поляризуемости η с интервалом, также равным сечению изолиний на разрезе, ря-

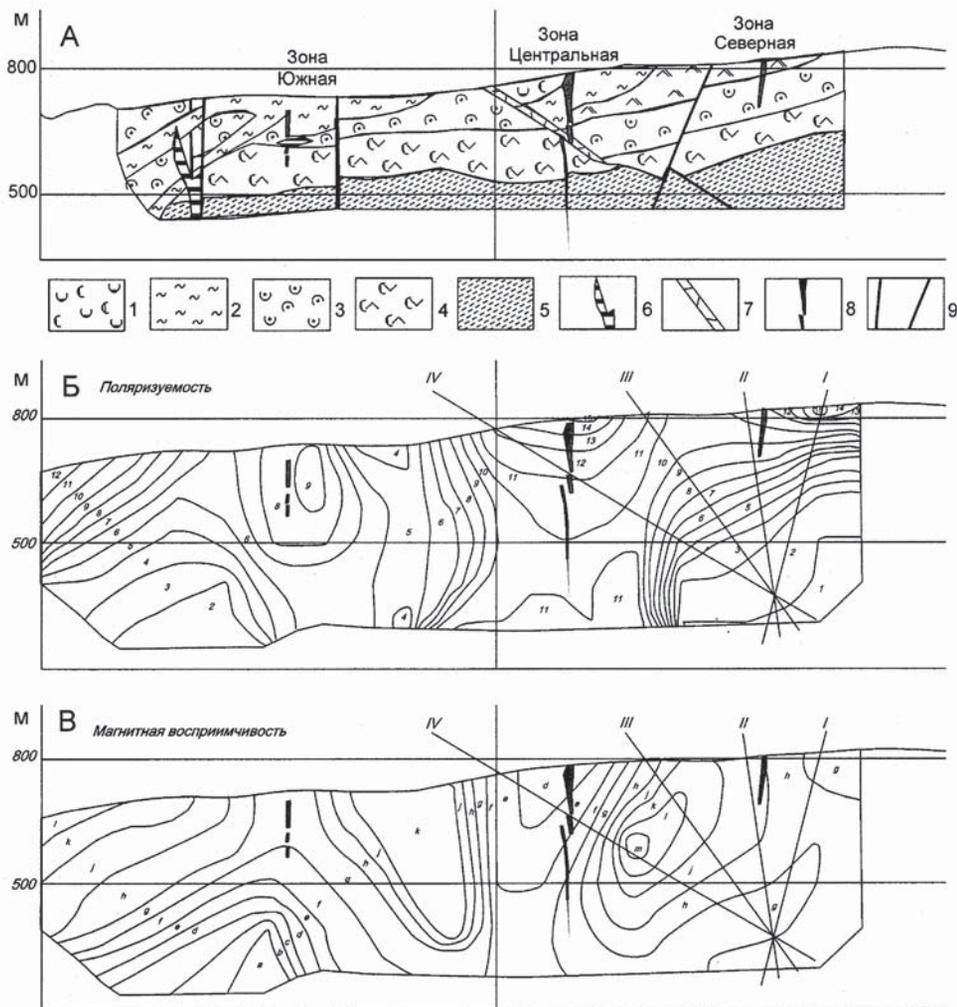


Рис. 1. Геологический разрез золото-серебряного месторождения Кубака (А; по данным [3, 9]) в сопоставлении с изолиниями значений электрических (Б) и магнитных (В) свойств пород. 1–5 — средне-позднедевонские отложения: 1 — агломератовые туфы, 2 — игнимбриты риодацитов, 3 — риодациты, 4 — игнимбриты, туфы и лавы дацитов и андезитов, 5 — туфоалевролиты; 6 — дайки габбро-порфиров мелового возраста; 7 — силлы риолит-дацитового состава; 8 — рудоносные адуляр-кварцевые жилы; 9 — разрывные нарушения; I–IV — направления фазовых траекторий для исследования перехода от пологих структур безрудных флангов к крутопадающим структурам месторождения

дом цифр 1, 2, 3, 4, 5, 6, ... (и т. д.), также в порядке возрастания. Таким образом, координатная плоскость, или двумерное фазовое пространство, стало разделено на ячейки, каждая из которых, как и на разрезе, имеет двойной индекс, например, 2с, 6г, 8h, ... и т. д.

Соотношение фазового и геометрического пространств переменных. Вернемся к разрезу совмещенных изолиний магнитной восприимчивости и поляризуемости на рис. 2А. Каждая элементарная ячейка разреза находит свое отображение на фазовой плоскости (рис. 2В), те и другие имеют одинаковый двойной индекс, например, 2с, 6г, 8h и т. п., по которым их можно отождествить, взаимно отобразить. При этом на фазовой плоскости ячейки с определенным индексом не повторяются, а в геометрической — их может быть больше одной. В геометрическом пространстве ячейки криволинейны, так как образованы пересечением изолиний двух переменных (рис. 2А), а на фазовой плоскости, в системе координат $\eta - \alpha$ ячейки прямоугольны (рис. 2В), зато криволинейность приобретают фазовые

траектории, которые могут «посетить» одну и ту же ячейку не один раз.

Чтобы перейти от геометрической плоскости разреза к фазовой плоскости и траекториям, удобно использовать *спектры значений переменных* (рис. 2Б). На спектрах в цифрах даны интервалы значений поляризуемости, в буквенных обозначениях — интервалы значений магнитной восприимчивости в соответствии с вышеописанными условиями. Например, вдоль линии III слева направо (а в геометрии вдоль той же линии III сверху вниз) мы имеем следующий двумерный спектр изменения переменных: 12h, 11h, 11j, 10j, 10k, 10l, 9l, 9k, 8k, 7k, 7j, 6j, 5j, 5h, 4h, 3h, 3g, 2g, 2h. Если перечисленные ячейки отметить на фазовой плоскости и соединить их плавной линией, получим фазовую траекторию III (рис. 2В).

Приведенный пример построения траекторий дает возможность познакомиться с двумя из их типов (см. далее), выявленных на месторождениях: линейных и угловых траекторий. По мере увеличения наклона направлений (рис. 2А) наблюдается усложнение траекторий в фазовом про-

странстве (рис. 2В) от практически линейных (траектория I), до угловых траекторий II, III, IV. После некоторого предела остроты угла (траектория IV) наблюдается усложнение траектории в виде петли: в ячейке 12e на этой траектории позиционируется рудная зона Центральная.

Типы фазовых траекторий в системе $\alpha - \eta$. В результате изучения фазовых траекторий трех месторождений-эталонов (включая месторождение Кубака, использованное выше для иллюстрации понятий фазового и геометрического пространств и методики построения фазовых траекторий) и систематизации (рис. 3) выделены несколько их типов: линейные траектории на безрудных флангах месторождений, угловые траектории в пограничной части месторождений, лепестковые и циклические траектории в рудоносной части месторождений и траектории «трещинного» типа, связанные с рудоконтролирующими структурами. Фазовые траектории всех типов меняют свое положение в фазовом пространстве от горизонта к горизон-

ту и от одного профиля (разреза) к другому, сохраняя свою структуру.

Совокупность траекторий определенного типа является фазовым отображением (фазовым портретом) определенной части месторождения, это позволяет говорить о *фазовых структурах* соответствующего типа.

Развернутые и угловые фазовые траектории (рис. 2В). Совокупность угловых траекторий является фазовым отображением пограничной части месторождения.

Для рудно-магматических систем месторождений, включающих рудоносные жилы, жильно-прожилковые зоны, тектонические разрывные структуры (как рудо-контролирующие, рудовмещающие, так и осложняющие их со смещением), системы малых интрузий, эксплозивные брекчии и т.п., характерно преобладание

крутопадающих элементов залегания. В связи с этим на границе рудно-магматической системы месторождений направление изолиний магнитной восприимчивости и поляризуемости с пологого на безрудных флангах изменяется на субвертикальное. В фазовом пространстве это области фазовых траекторий углового типа. Соединив геометрические места «углов» всех обнаруженных фазовых траекторий углового типа, мы определим границу рудно-магматической системы месторождения.

Лепестковые фазовые траектории (рис. 3А) в системе $\eta - \alpha$ околорудных метасоматитов присутствуют на всех трех исследованных месторождениях золота и серебра; с этим типом сложности фазовых траекторий связаны основные рудные тела.

Отметим, что сами руды не представлены в физических свойствах, так как все образцы руд истерты для определения содержаний полезных компонентов и других химических элементов; мы будем определять местонахождение руд по физическим свойствам околорудных метасоматитов. И это более корректно с поисковой точки зрения. В пределах месторождения, контуры которого уже определены по угловым фазовым траекториям, лепестковые траектории на разрезах удобно выявлять по горизонтам через 100 м, на планах — по линиям буровых профилей. Если конфигурация изолиний сложна, что наблюдается довольно часто в наиболее оруденелых частях месторождений, то дополнительно рекомендуется строить траектории по поперечным направлениям, а если это разрез, то — в вертикальных направлениях с интервалом 200 м.

Место оруденения в фазовом пространстве — либо в вершинах лепестков (гидротермально-метасоматические жильно-прожилковые образования), либо в их основаниях (минерализованные тектониты).

Так, на Майском золото-сульфидном месторождении в одном из разрезов на фазовой траектории вдоль горизонта 0 м в вершинах лепестков заняли фазовую позицию рудные тела зон Тундровая и Восток (рис. 3А). На той же траектории в основаниях лепестков оказалось фазовое место рудных зон Пунктирная, Главная, Кварц-сульфидная и Арсенопиритовая. Осуществив геометризацию коррелирующихся экстремумов фазовых траекторий лепесткового типа на нескольких горизонтах, мы определим каждую из рудных зон в изучаемом петрофизическом разрезе месторождения (рис. 4).

Отметим, что в геофизике (и геохимии) аномалия считается достоверной, если выражена не менее чем тремя изолиниями. В фазовом и геометрическом пространствах двух переменных рудные зоны также выделяем по двум-трем ячейкам (с двойным индексом).

На серебряном месторождении Дукаст в приведенном разрезе АБВ по траектории вдоль горизонта +600 м (рис. 3А) отмечена фазовая позиция рудных тел — зон XXXVIII и I — в вершинах лепестков в данной траектории. Фазовое место рудных зон XXXIX, VIII-A и XIII приурочено к основаниям лепестков. На рис. 4 показано положение перечисленных рудных зон данного месторождения в геометрическом пространстве — в разрезе.

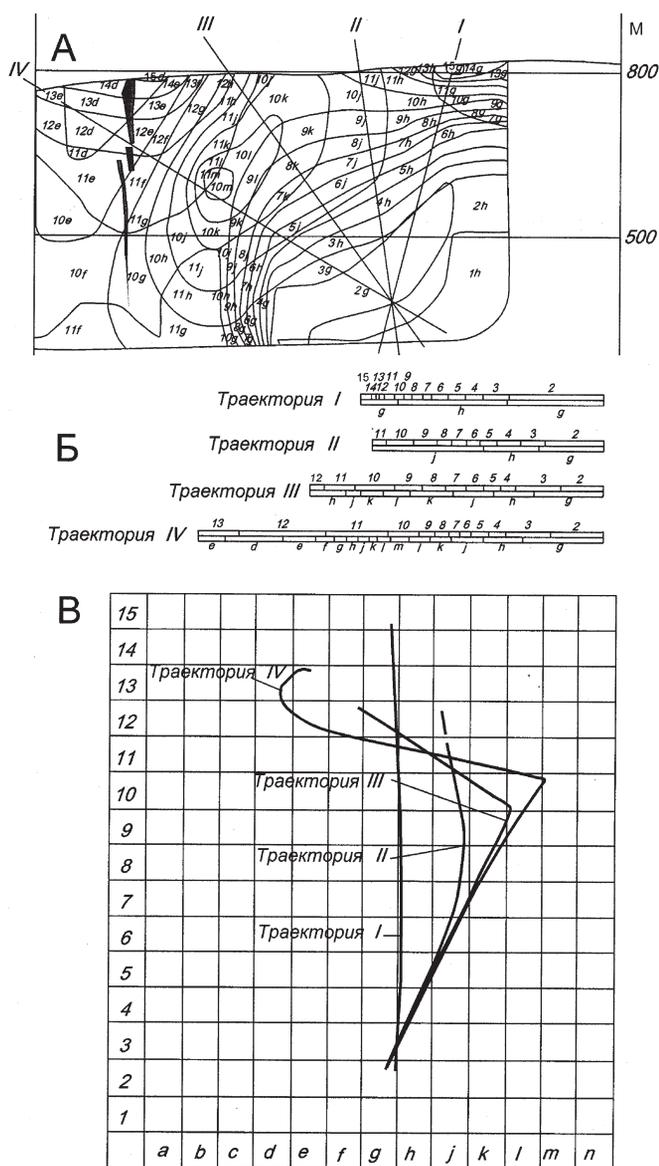


Рис. 2. Соотношение геометрического и фазового пространства двух переменных — «поляризуемость η — магнитная восприимчивость α » на примере золото-серебряного месторождения Кубака. А — двумерное геометрическое пространство переменных $\eta - \alpha$ (фрагмент разреза — см. рис. 1); Б — двумерные спектры переменных $\eta - \alpha$ в направлениях I, II, III, IV; В — фазовые траектории линейного и углового типов

На рис. 4 представлено также положение в геометрическом пространстве рудных зон золото-серебряного месторождения Кубака (геологический разрез по этой линии см. на рис. 1). Фазовая траектория вдоль горизонта +500 м (рис. 3А) пересекает Центральную и Южную рудные зоны, их фазовая позиция — в вершинах лепестков данной траектории. Так как рудная зона Северная имеет небольшое распространение на глубину, то на горизонте +500 м она отсутствует.

Если лепестки принимают округлую форму, а пересекаемые ею рудные тела приурочены не к экстремумам, а «размазываются» по всему лепестку, значит, где-то недалеко мы обнаружим циклические фазовые траектории.

Циклические фазовые траектории (рис. 3Б) присутствуют на всех трех исследованных месторождениях золота и серебра, характерны для оруденелой части месторождений, в них имеют фазовую позицию от одного до пяти и более рудных тел. Траектории циклического типа занимают небольшую область фазового пространства, как правило, в низких значениях η и α . Циклы могут состоять из 0,5–1,5 оборотов (месторождение III), 1,5–3 (месторождение I), 3–4 оборотов (месторождение II).

На Майском золото-сульфидном месторождении циклические фазовые траектории на западном фланге на глубине 500–900 м от поверхности обнаружены в области сближения пологих рудных тел зон Тундровая и Пунктирная с рудными телами крутого падения зоны Главной; вверх по разрезу они расходятся. На восточном фланге область циклических фазовых траекторий находится на сочленении зоны Восточного разлома и рудных зон Восток и Арсенипиритовая (рис. 4).

На серебряном месторождении Дукат циклические траектории обнаруживаются в верхней части разреза в виде субгоризонтальной полосы, выходящей на эрозионный срез. Это область ветвления рудных тел с увеличением их количества (рис. 4).

На золото-серебряном месторождении Кубака в

разрезу по буровой линии 40 в траектории +700 м рудная зона Центральная связана с циклической структурой (рис. 3 Б-III).

Итак, два типа фазовых структур — лепестковые и циклические — составляют совокупную фазовую структуру месторождения той или иной золоторудной формации, что позволяет выделить в них область развития стволочных жил и область ветвления рудных тел.

Трещинные фазовые траектории (рис. 3В) выражены одиночными лепестками или петлями, при геометризации трассируют рудоконтролирующие **тектонико-физические** (т.е. выраженные в физических свойствах) структуры.

Золото-сульфидное месторождение Майское находится на пересечении зоны разрывных нарушений субширотного простирания, которая целиком вмещает месторождение, с зонами разрывных наруше-

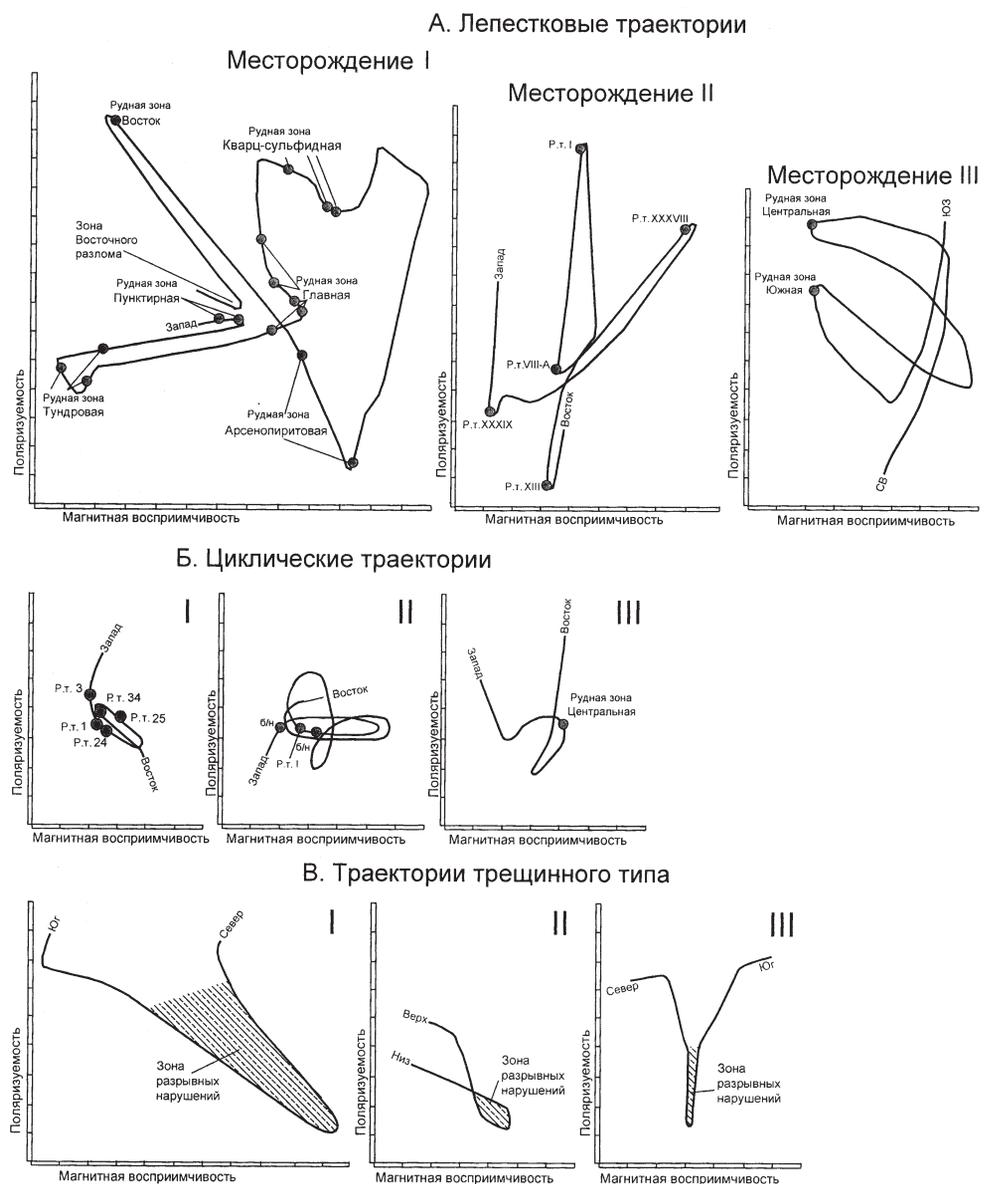


Рис. 3. Типы фазовых траекторий в системе «поляризуемость — магнитная восприимчивость». Месторождения: I — Майское золото-(мышьяковисто)-сульфидной формации; II — серебряное Дукат золото-серебряной формации; III — Кубака золото-серебряной формации

ний других направлений. Западный фланг субширотной структуры выражен в виде одиночного лепестка фазовой траектории С — Ю (рис. 3В-I).

Крутопадающие тектоно-физические структуры присутствуют на всех месторождениях (рис. 4): на Майском месторождении это зона Восточного разлома, на месторождении Дукат — зона сопряженных Восточного и Встречного разломов (рис. 3В-II), на месторождении Кубака — трещинная структура между Кольцевым и Риолитовым разломами (рис. 3В-III).

Пологие тектонофизические структуры также характерны для всех месторождений. На Майском месторождении такая структура прослежена на восточном фланге, имеет мощность около 400 м. На месторождении Дукат пологая структура хорошо выражена на западном фланге в верхней части разреза, имеет мощность около 200 м. Выделена также пологая структура на юго-западе месторождения Кубака (на разрезе — слева).

В пределах оруденелых частей месторождений пологие разрывные структуры выражены нарушениями корреляции рудных зон, например, на месторождении Кубака (рис. 4).

Таким образом, исследованы числовые модели месторождений золота и серебра трех разных рудно-формационных типов посредством адаптированного к геологическим задачам метода фазовых траекторий в системе «поляризуемость — магнитная восприимчивость» пород. Эмпирически выявлены характерные для месторождений типы фазовых структур, геометризация которых позволяет практически однозначно оконтурить месторождение, выделить рудоконтролирующие структуры и рудные тела. Сделан вывод о существовании для месторождений золото-серебряного класса, независимо от их рудно-формационной принадлежности, общих критериев нелинейного характера, обнаруживаемых фазово-структурным методом по физическим характеристикам пород.

Следует отметить, что с позиций нелинейной динамики *угловые* фазовые структуры в системе $\eta - \alpha$ могут рассматриваться как совокупность подсистем прямой

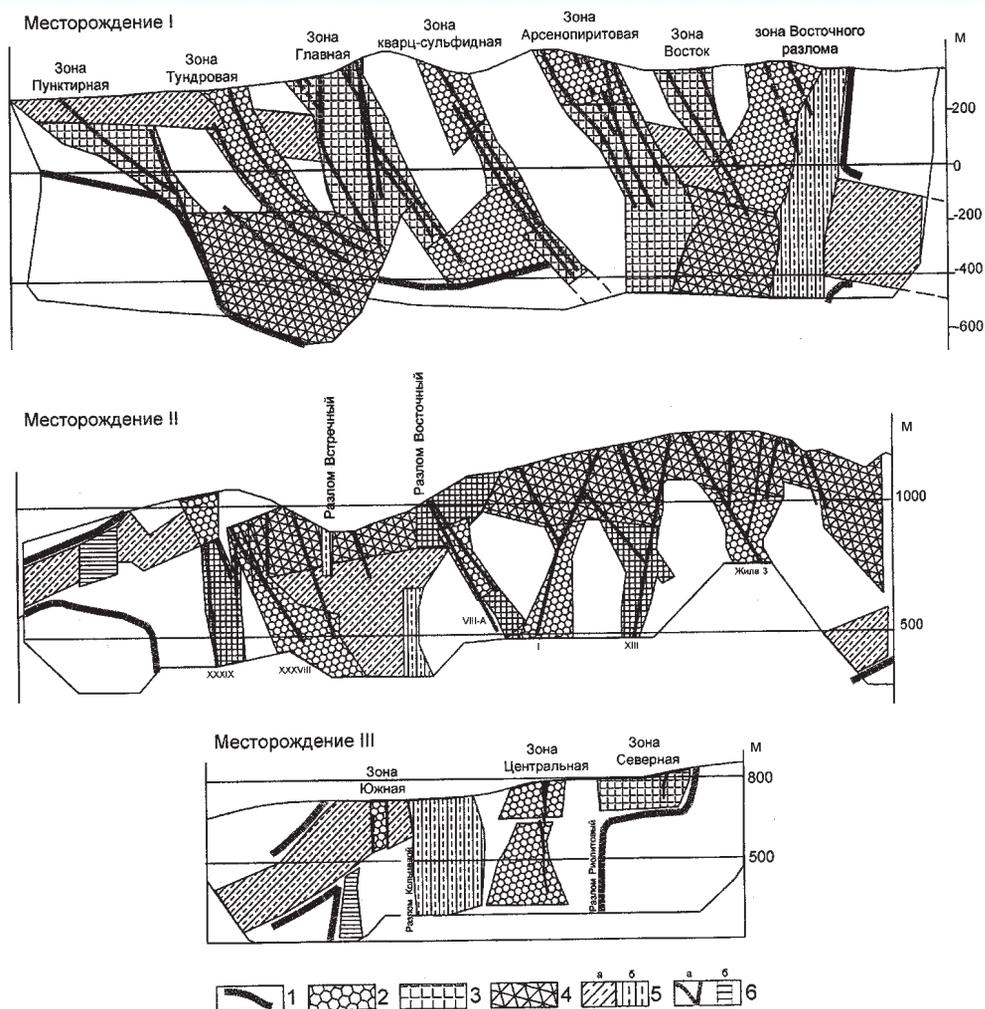


Рис. 4. Эффективность использования фазово-структурных критериев (в системе «поляризуемость — магнитная восприимчивость») в решении обратной задачи прогнозирования (картирования) рудных тел на эталонных месторождениях. 1 — контуры месторождений; 2 — рудные зоны, включая околорудные метасоматиты, имеющие фазовую позицию в вершинах лепестковых структур (преимущественно жильно-прожилковые системы); 3 — рудные зоны и околорудные метасоматиты, имеющие фазовую позицию в основаниях лепестковых структур (преимущественно минерализованные тектониты); 4 — зоны циклических фазовых траекторий (участки ветвления рудных тел); 5 — рудоконтролирующие (тектоно-)физические структуры: а — пологие, б — крутого падения; 6 — рудные тела: а — известные, б — предполагаемые по фазово-структурным критериям околорудных метасоматитов

и обратной связи, которые спонтанно возникают, проявляясь как изменения взаимозависимостей свойств пород, под воздействием извне. Появление фазовой неустойчивости на сопряжении под углом лучей прямой и обратной связи повлекло за собой дальнейшее усложнение в виде лепестковых фазовых структур. Каждый из лепестков представляет собой две сближенные линии регрессии, соединяющиеся на экстремумах лепестка (это фазовое состояние неопределенности, отсутствия взаимозависимостей). В этих местах процесс структурирования переходит с макро- на микроуровень — уровень минералообразования. Никакими другими средствами, кроме построения фазовых траекторий по осредненным значениям переменных, выявление структур разной сложности с выяснением фазовой позиции мест рудоотложения не представляется возможным. Два типа фазовых структур, лепестковые и циклические в системе $\eta - \alpha$, составляют совокуп-

ЖЕЛЕЗИСТО-КРЕМНИСТЫЕ ФОРМАЦИИ РАННЕГО ДОКЕМБРИЯ И ПРОБЛЕМА КИСЛОРОДА

*Используя материалы реконструкции железисто-кремнистых формаций раннего докембрия, автор обсуждает источник кислорода земной коры, время появления кислорода в атмосфере и его поведение в процессах метаморфизма. **Ключевые слова:** ранний докембрий, железисто-кремнистые формации, кислород, земная кора, метаморфизм, палеоатмосфера.*

Bergman I.A. (VIMS)

THE IRON-SILICEOUS FORMATIONS OF THE EARLY PRECAMBRIAN AND THE PROBLEM OF OXYGEN

*Using materials for the reconstruction of the Early Precambrian iron-siliceous formations the author discusses the provenance for oxygen of the Earth crust, the time of origin of the oxidizing atmosphere and behavior of oxygen in the metamorphic processes. **Key words:** the Early Precambrian, iron-siliceous formations, oxygen, the Earth crust, metamorphism, paleoatmosphere.*

Проблеме кислорода в земной коре посвящена обширная литература. Но, по-прежнему, слабым местом в этой проблеме остается ранний этап формирования коры, источник кислорода и время возникновения кислородной атмосферы, поведение кислорода в процессах метаморфизма.

Выполненная автором статьи реконструкция докембрической и первичной природы железисто-кремнистых формаций, являющихся *планетарными образованиями*, условий их формирования и метаморфизма позволяет внести ряд существенных изменений в представления именно о раннем этапе появления атмосферы. Сделаем это, привлекая модель зарождения кислородной атмосферы, разработанную В.И. Бгатовым [2], в которой затронуты ключевые аспекты взглядов по обсуждаемой теме.

Согласно указанному автору, докембрий по сравнению с фанерозоем еще плохо изучен. Большинство исследователей предполагает, что свободный кислород в атмосфере появился с началом палеозойской эры, что ограничивает распространение актуалистического метода изучения природы этим временем. Все еще нет методов реставрации осадочного докембрия (это на 1985 г. — И.Б.), тем более в условиях бескислородной атмосферы. В.И. Бгатов задается вопросом: «можно ли представить ход докембрических осадочных процессов в бескислородной атмосфере, если мы знаем, что горные породы докембрия и фанерозоя по химическому составу идентичны» [2].

Не исключая элементов сходства химического состава пород докембрия и фанерозоя, заметим: 1) начиная с 1,8 млрд. лет все породы раннего докембрия являются метаморфизованными образованиями, тогда как в фанерозое преобладают неметаморфизованные породы, поэтому сравнивать по конечному результату

ную фазовую структуру месторождения той или иной золоторудной формации, они позволяют выделить область развития стволочных жил и область ветвления рудных тел.

Предложенный фазово-структурный метод исследования показал определенные преимущества его использования на сложных объектах, каковыми являются месторождения золота и серебра, руды которых и околорудные метасоматиты не аномальны по своим физическим характеристикам. Эффективность выделения рудных тел (вместе с околорудными метасоматитами) в масштабе 1:10 000 с помощью фазово-структурных критериев необычно высока. Причина этого в том, что метод позволяет избавиться от неоднозначности и нелинейности, содержащихся в гистограммах и облаках регрессии переменных, которые сохраняются, как бы мы ни ужесточали требования к чистоте выборок пород или эталонов для прогнозирования [8]. В предложенном подходе неоднозначность и нелинейность, содержащиеся в статистических совокупностях, которые обнаруживаются, когда мы пытаемся на их основе решать задачу прогнозирования, переходят в нелинейные фазовые траектории, становятся наглядными и пригодными для использования.

Фазово-структурный метод может оказаться эффективным во многих исследованиях геологических объектов на основании числовых моделей [5], полученных в результате лабораторных измерений или каким-либо другим путем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Волков А.В. Месторождение Майское / Многофакторные прогнозно-поисковые модели месторождений золота и серебра Северо-Востока России / Под ред. М.М. Константинова, И.С. Розенблюма, М.З. Зиннатуллина. — М.: Недра, 1992. — С. 79–127.
2. Калинин А.И. Структура сереброрудного поля и месторождения в ультракалийевых риолитах Охотско-Чукотского вулканического пояса / Структуры рудных полей и месторождений вулканических поясов. — Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1986.
3. Константинов М.М., Некрасов Е.М., Сидоров А.А., Стружков С.Ф. Золоторудные гиганты России и мира. — М.: Научный мир, 2000.
4. Мезенцева А.Е. Метод фазовых траекторий для прогноза золоторудных месторождений / Самоорганизация минеральных систем. Синергетические принципы геологических исследований / Под ред. П.М. Горяинова, Г.Ю. Иванюка. — М.: Геос, 2001. — С. 146–158.
5. Мезенцева А.Е. Принципы самоорганизации и динамика формирования рудообразующих систем на примере золото-серебряных месторождений Северо-Востока России / Геологическое строение, магматизм и полезные ископаемые Северо-Восточной Азии: Тез. докл. IX сессии СВО ВМО — Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 1997. — С. 116–120.
6. Мезенцева А.Е., Есипенко А.Г. Физические свойства околорудных метасоматитов месторождений золота и серебра Северо-Востока РФ: сравнительная характеристика, проблемы, задачи // Разведка и охрана недр. — 2014. — № 10. — С. 31–37.
7. Ольшевский В.М., Мезенцева А.Е. Структура золото-сульфидного месторождения в Охотско-Чукотском вулканическом поясе / Структуры рудных полей и месторождений в вулканических поясах. — Владивосток: ДВГИ, 1986. — С. 72–90.
8. Справочник по математическим методам в геологии. — М.: Недра, 1987.
9. Степанов В.А., Морозова Л.В., Макурин В.Н. Месторождение Кубака / Многофакторные прогнозно-поисковые модели месторождений золота и серебра Северо-Востока России / Под ред. М.М. Константинова, И.С. Розенблюма, М.З. Зиннатуллина. — М.: Недра, 1992. — С. 60–66.

© Мезенцева А.Е., 2015

Мезенцева Антонина Евгеньевна // amezentseva@yandex.ru