

МЕТОД МНОГОМЕРНЫХ ФАЗОВЫХ ТРАЕКТОРИЙ ДЛЯ ПОИСКОВ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Калашников А.О., Иванюк Г.Ю., Горяинов П.М.
(Геологический институт Кольского НЦ РАН)

Участки земной коры, в которых многие, если не все, геологические переменные демонстрируют когерентное поведение, являются наиболее перспективными для выявления концентраций полезных ископаемых. Одним из методов выявления таких участков по геохимическим и/или петрофизическим данным является метод «фазовых траекторий». Авторы развили данный подход и апробировали его на ряде рудных объектов различного возраста, масштаба и генезиса. Во всех случаях метод продемонстрировал высокую прогностическую эффективность, а в одном из них позволил выявить коренное золотосеребряное оруденение.

Введение

Не секрет, что результаты геохимической съемки зачастую оказываются малоприменимыми для прогнозно-поисковых целей. А происходит это, чаще всего, из-за неверного подхода к интерпретации полученных данных. Стандартная статистическая обработка последних обычно осуществляется в расчете на то, что изучаемый геологический объект является термодинамически равновесной системой. В этом случае по геохимическим ореолам, действительно, можно выявить источник рудного вещества (месторождение или рудопоявление). Однако для геологических систем, сформировавшихся путем самоорганизации, подобный подход не эффективен, поскольку рудный объект либо никак не проявляет себя в геохимическом поле, либо и вовсе окружен отрицательными аномалиями полезного компонента [Горяинов, Иванюк, 2001]. Для преодоления недостатков традиционной интерпретации результатов геохимической съемки А.Е.Мезенцева предложила новый подход, опирающийся на положения теории диссипативных структур, – метод фазовых траекторий [Горяинов, Иванюк, 2001].

Исходным положением, лежащим в основе этого метода, является утверждение, что месторождения и рудопоявления являются наиболее упорядоченными участками земной коры [Горяинов, Иванюк, 2001; Калашников, 2008а]. Оценивать относительную упорядоченность можно по самым разным свойствам геологической системы: по степени дифференцированности разреза [Николаев, Горяинов, 1990; Базай, Иванюк, 1996], фрактальной размерности полосчатости, складок и изолиний рельефа [Горяинов, Иванюк, 2001; Иванюк, Горяинов, 2007], по фототону аэро- и космоснимков [Калашников, 2008а], по степени дифференцированности геохимического поля [Калашников, 2008б] и др. Предлагаемый в данной работе метод выявления перспективных территорий базируется на выявлении участков, в которых пространственная когерентность различных переменных (состава, текстурно-структурных характеристик и петрофизических свойств горных пород, состава и свойств сквозных минералов, геофизических и геоморфологических характеристик и др.) достигает своего наивысшего значения [Егоров, Иванюк, 1996; Горяинов, Иванюк, 2001; Иванюк, Горяинов, 2007].

Описание метода

Метод фазовых траекторий основывается на представлении о том, что зоны минерализации (рудные тела, рудопоявления, месторождения) приурочены к тем участкам геологической распределенной диссипативной структуры, в которых поведение переменных максимально взаимосогласованно (т.е. их изменение в пространстве происходит когерентно). Впервые он был применен А.Е.Мезенцевой [Горяинов, Иванюк, 2001] для выявления золотосеребряного оруденения на одном из месторождений Северо-Востока России. Рассматриваемое месторождение образовалось в средне-верхнедевонском стратифицированном вулканогенно-осадочном комплексе, подвергшемся пропилитизации на площади 30–35 км². На данной площади были произведены поисково-разведочные работы, включающие геохимическое опробование по неравномерной сети скважин и канав (см. рис 1). Стандартные статистические зависимости между составом и петрофизическими свойствами пород никакой связи с зонами оруденения не выявили, в связи с чем А.Е.Мезенцевой была предпринята попытка интерпретировать полученные

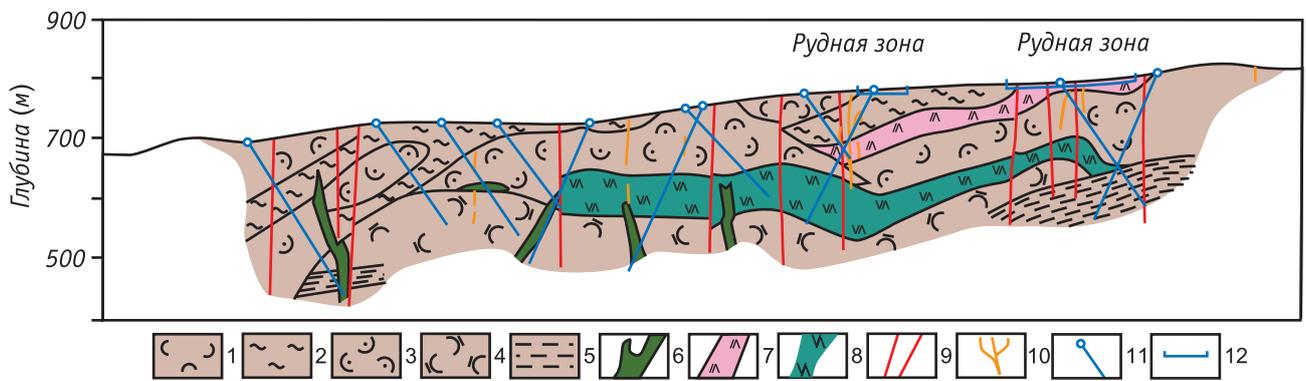


Рис. 1. Схематический геологический разрез золотосеребряного месторождения (Розенблюм и др., 1992). Средне-позднедевонские отложения: 1 – агломеративные туфы, 2 – иллы риолитов, 3 – туфопесчаники, 4 – туфы кислого состава, 5 – туфопесчаники с прослоями туфоалевролитов (ритмиты); интрузивный комплекс среднего-позднего девона: 6 – нижнее-верхнемеловые дайки щелочных габбро-порфиридов, долеритов и липаритов; 7 – силлы липарито-дацитового состава, 8 – силлы андезитово-дацитового состава; 9 – разрывные нарушения, 10 – рудоносные жильные тела, 11 – поисковые и разведочные скважины, 12 – каналы.

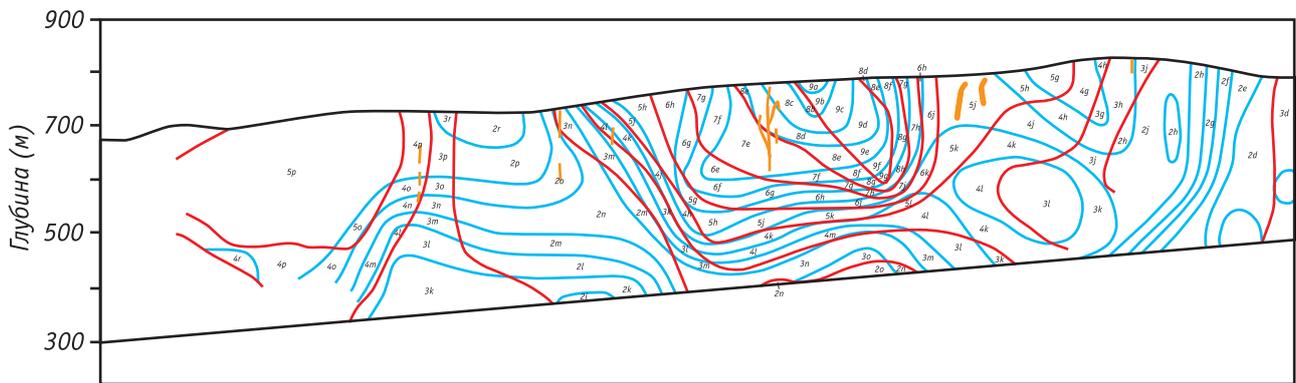


Рис. 2. Соотношение концентраций Ca и Au в разрезе золотосеребряного месторождения (по А.Е.Мезенцевой). Красными изолиниями обозначено содержание золота, синими – кальция.

данные, анализируя пространственные фазовые траектории. Построение последних выполнялось следующим образом. Интервалы между изолиниями каждого элемента обозначались условными единицами. Полученные карты изолиний содержания различных элементов совмещались, и каждой ячейке присваивалось значение по значению двух соответствующих интервалов (на рис. 2 показаны совмещенные карты изолиний Au и Ca). Далее по какой-либо произвольно проведенной по разрезу линии определялась последовательность ячеек, и в соответствии с ней строилась фазовая траектория в координатах выбранных элементов (на рис. 3 приведена фазовая траектория для гипсометрического уровня +600 в координатах Ca и Au). Петли (перегибы, экстремумы) полученной таким образом фазовой траектории истолковывались как потенциально рудоносные зоны, что подтверждается действительным местоположением рудопроявлений (см. рис. 2). Те же самые зоны выделялись в координатах всех других переменных (геохимических и петрофизических), – именно потому, что рассматриваемая структура относится к классу когерентных структур.

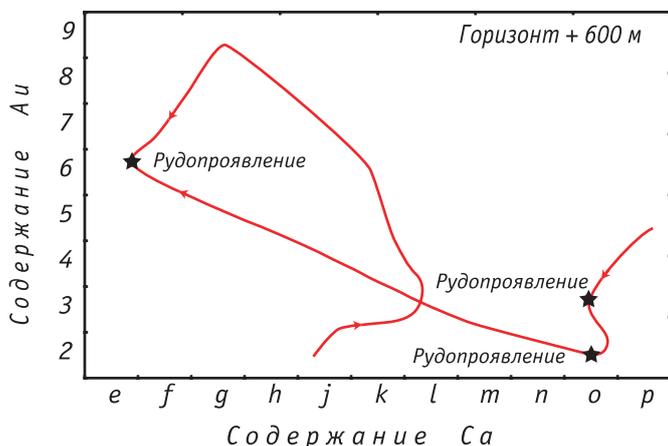


Рис. 3. Фазовая траектория для гипсометрического уровня +600 разреза, приведенного на рис. 1. Звездочками обозначены положения золоторудных жил.

Предлагаемый нами метод базируется на подобной логической канве, только имеет дело уже не с двумерным фазовым пространством, а с многомерным. Мерность фазового пространства определяется количеством имеющихся в распоряжении исследователя переменных, и в принципе, может быть любым. Для того чтобы оценить универсальность метода, для апробации были выбраны принципиально разные объекты: архейское Оленегорское железорудное месторождение, палеозойский Хибинский массив нефелиновых сиенитов и фойдолитов, и перспективный в отношении ртути, золота и полиметаллов участок в пределах Забайкальской золотоносной провинции протерозойского возраста.

Золотосеребряное оруденение в породах Оленегорского железорудного месторождения

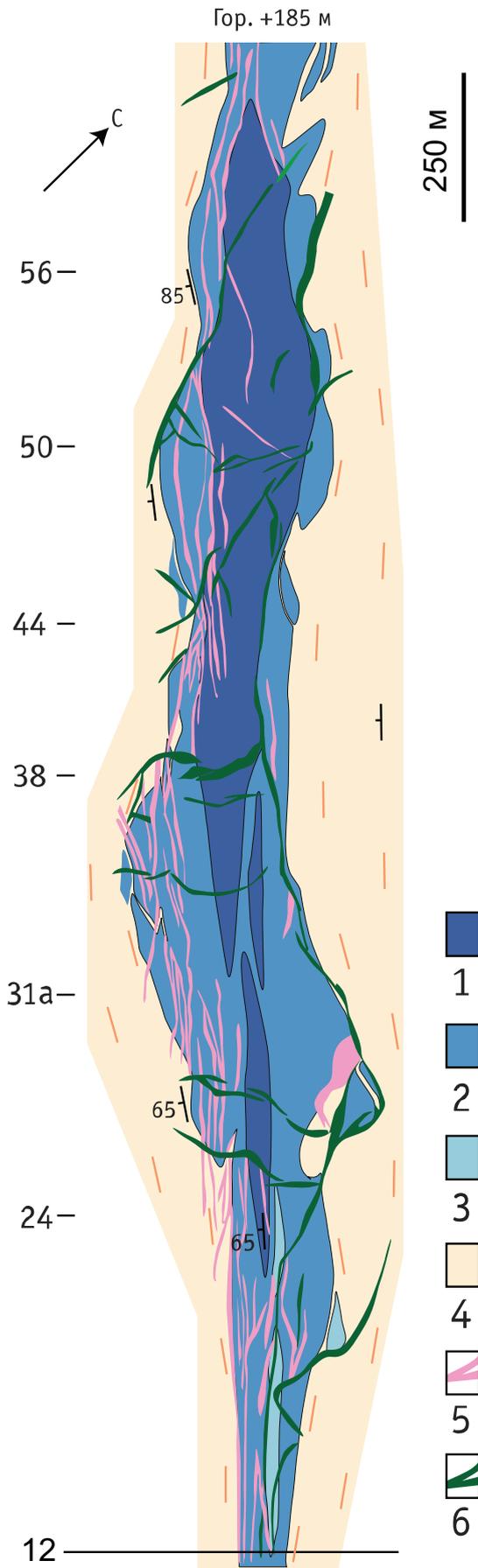


Рис. 4. Схема геологического строения Оленегорского месторождения (горизонт +185 м). 1-3 – железистые кварциты: 1 – гематит-магнетитовые, 2 – магнетитовые, 3 – сульфидно-магнетитовые; 4 – гнейсы ПЖФ; 5 – гранитные пегматиты; 6 – долериты.

Оленегорское железорудное месторождение находится в северо-восточной части Приимандровской структуры (Мурманская область), 20-километровый овал тоналитовых гнейсов которой окружен симметрично-зональной толщей пород полосчатой железорудной формации (ПЖФ) мощностью от 0.2 до 3 км, представленной железистыми кварцитами, магнетито-карбонатными породами, скарноидами, нодулярными, биотито-мусковитовыми, биотитовыми и роговообманковыми гнейсами, актинолитовыми, жедритовыми и роговообманковыми амфиболитами (рис. 4). На сегодняшний день месторождение вскрыто на глубину почти 400 м, а разведочными скважинами – почти на 2 км. На СЗ фланге месторождения рудное тело залегает неглубоко и ныне полностью выработано, на ЮВ фланге, наоборот, погружается на глубину более километра. Повсюду железистые кварциты обнаруживают согласное залегание с вмещающими гнейсами. Рудное тело характеризуется почти идеальной замкнутой аутигенной зональностью (от контакта с гнейсами к осевой зоне): слабрудные сульфидно-магнетитовые железистые кварциты – рудные магнетитовые железистые кварциты – рудные гематито-магнетитовые железистые кварциты.

Железистые кварциты Оленегорского месторождения отличаются наибольшим среди аналогичных пород других месторождений Приимандровской структуры разнообразием слагающих их минеральных ассоциаций. Гематито-магнетитовые железистые кварциты представлены здесь своими флогопитовыми, тремолитовыми, антофиллитовыми, тальковыми, клинохлоровыми и переходными между ними разновидностями (\pm андрадит, кальцит, магнезиальная роговая обманка и др.), магнетитовые железистые кварциты в качестве порообразующих силикатов могут иметь биотит, диопсид-геденбергит, антофиллит, актинолит-ферроактинолит и грюнерит в ассоциации друг с другом, а также с альмандином, эпидотом и роговой обманкой. В сульфидно-магнетитовых железистых кварцитах преимущественное распространение получил грюнерит с переменным количеством геденбергита, железистой роговой обманки, эпидота и альмандина.

С породами Оленегорского месторождения связана бескорневая золотосеребряная минерализация [Голиков и др., 1999; Иванюк и др., 2001]. Ее положение долгое время не удавалось установить, хотя самородное золото постоянно присутствовало в тяжелой фракции отсадки Оленегорского ГОКа (с целью доизвлечения немагнитного гематита хвосты магнитной сепарации направлялись на гравитационные столы, где попутно с гематитом и были получены обогащенные до 40 г/т концентраты золота).

Нам было ясно, что для поиска конкретных рудопроявлений золота необходимы достаточно масштабные геохимические работы, но для выявления наиболее вероятного места оруденения, скажем, в зональной толще пород ПЖФ можно использовать и средний состав соответствующих пород. В качестве модельного объекта для такой оценки мы взяли один из известных разрезов Оленегорского месторождения (ЮВ фланг, профиль 12), на котором провели имитацию геохимического опробования по нерегулярной сети с интервалом от 20 м в зонах частой перемежаемости пород (вблизи и внутри рудной зоны) до 100 м на периферии. Каждой точке присваивался средний состав соответствующей породы на Оленегорском месторождении. Обработав методом многомерных фазовых траекторий результаты этого «виртуального» геохимического опробования, мы в итоге получили карту распределения участков с различной степенью когерентности петрогенных элементов (рис. 5).

Согласно вышеозначенному критерию, наиболее перспективные участки оказались приурочены к контакту железистых кварцитов с покрывающими нодулярными гнейсами и лептитам. По сути, они фиксируют отмечаемую многими исследователями [Жданов, Малкова, 1974; Горяинов, 1976; Иванюк и др., 1999] зону развития рудных и безрудных скарноидов, площадных апогнейсовых метасоматитов (нодулярных гнейсов, микроклинитов, эпидозитов) и сосредоточения низкотемпературных гидротермальных жил [Иванюк и др., 2001]. Заметим, что составы вышеперечисленных пород мы в рассматриваемую модель не закладывали, так что положение метасоматитов было выявлено по пространственному соотношению только главных пород ПЖФ.

Ограничив область поиска вышеперечисленными метасоматитами и сосредоточив особое внимание на рудных сульфидсодержащих скарноидах, мы уже в первых шести из восьми образцов из сборов

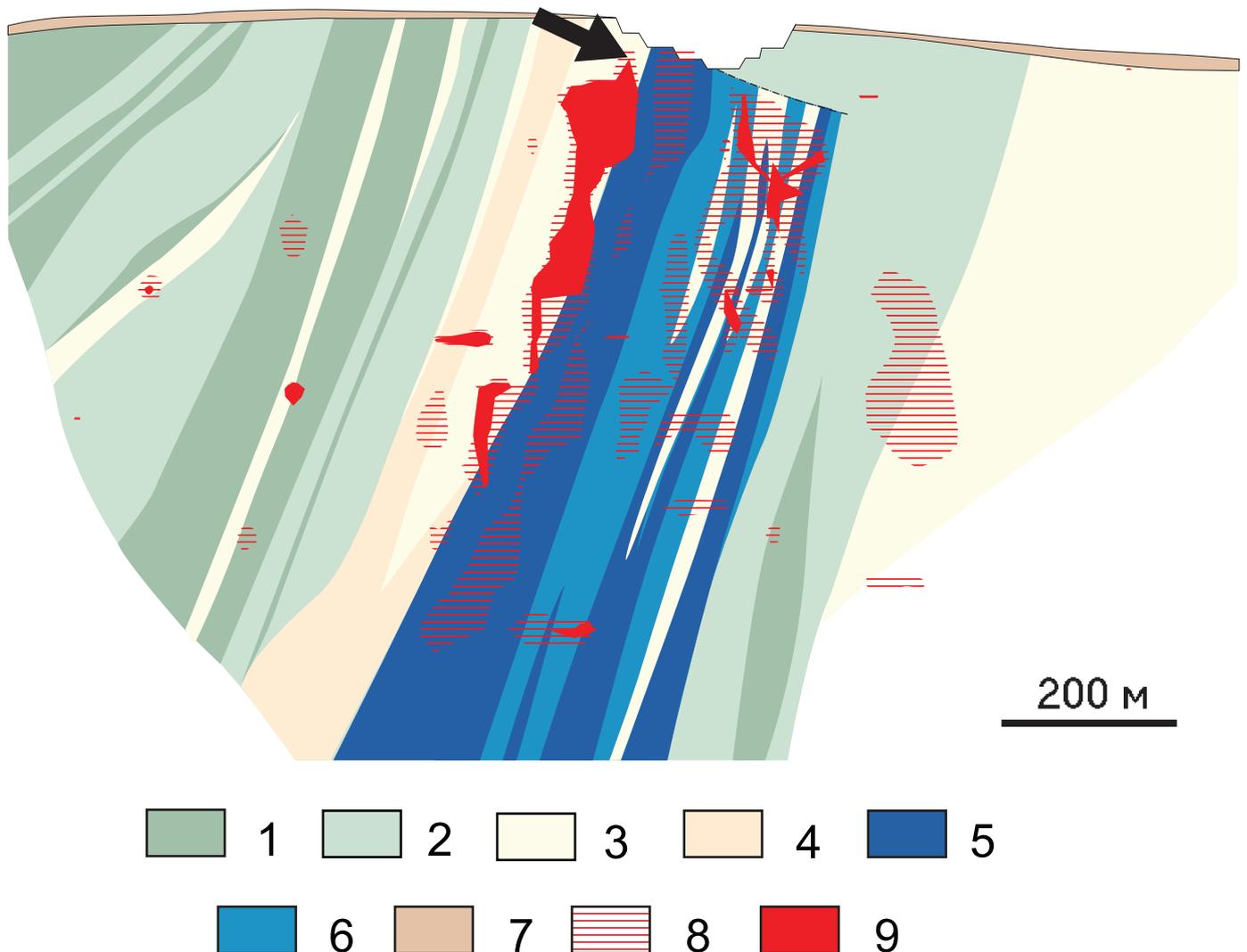


Рис. 5. Участки, перспективные на благороднометальное оруденение, выделенные с помощью метода многомерных фазовых траекторий в разрезе Оленегорского железорудного месторождения (Кольский полуостров). 1 – роговообманковые и ждритовые амфиболиты; 2 – биотит-роговообманковые гнейсы; 3 – лептиты и нодулярные гнейсы; 4 – биотитовые гнейсы; 5 – гематит-магнетитовые и магнетитовые железистые кварциты; 6 – сульфидно-магнетитовые железистые кварциты; 7 – четвертичные образования; 8 и 9 – перспективные участки: 8 – менее, 9 – более перспективные. Стрелкой обозначено место отбора проб, содержащих благороднометальную минерализацию.

20-летней давности обнаружили множество минералов золота, серебра и висмута, не известных до этого на месторождениях ПЖФ Кольского полуострова [Базай, Иванюк, 2006]. В целом же благороднометальное оруденение, представленное акантитом, аурикупридом, вольтинским, гесситом, кервеллеитом, павонитом, петцитом, серебром и электрумом, зафиксировано нами в 70 % изученных образцов рудных сульфидсодержащих скарноидов Оленегорского месторождения. Более того, опираясь на полученные результаты, мы проверили на золотоносность скарноиды и магнетито-клинопироксеновые породы соседнего Кировогорского месторождения, и также обнаружили в них постоянное присутствие минералов золота и серебра.

Таким образом, выявление участков коренного золотосеребряного оруденения на месторождениях ПЖФ оказалось не только весьма успешным, но и несопоставимо менее затратным по сравнению с любыми другими подобными работами.

Апатитовые месторождения Хибинского массива

Хибинский массив нефелиновых сиенитов (рис. 6) расположен в западной части Кольского полуострова на контакте архейских гранитогнейсов Кольско-Норвежского мегаблока и протерозойского зеленокаменного пояса Имандра-Варзуга. В плане массив имеет форму овала, слабо вытянутого в широтном направлении. По геофизическим данным [Шаблинский, 1963], внешний контакт массива до глубины 6-8 км круто падает (под углом 70-90°) к осевой линии, а затем резко выполаживается. Главными породами массива являются фойяиты, слагающие более 70% его объема. Тело фойяитов разделено на две приблизительно равные по объему части Главной кольцевой зоной мельтейгит-уртитов и апатито-нефелиновых пород мощностью от 50–500 м на севере до 1500–2000 м на юго-западе. Главное кольцо почти на всем своем протяжении имеет симметрично-зональное строение (от контакта с фойяитами к осевой зоне): рихсчорриты и лявочорриты – фойидолиты – апатито-нефелиновые породы. Такая зональность массива подчеркивается наличием между рихсчорритами и фойяитами почти непрерывного кольца ксенолитов ороговикованных и фенитизированных вулканогенно-осадочных пород, а также приуроченностью более

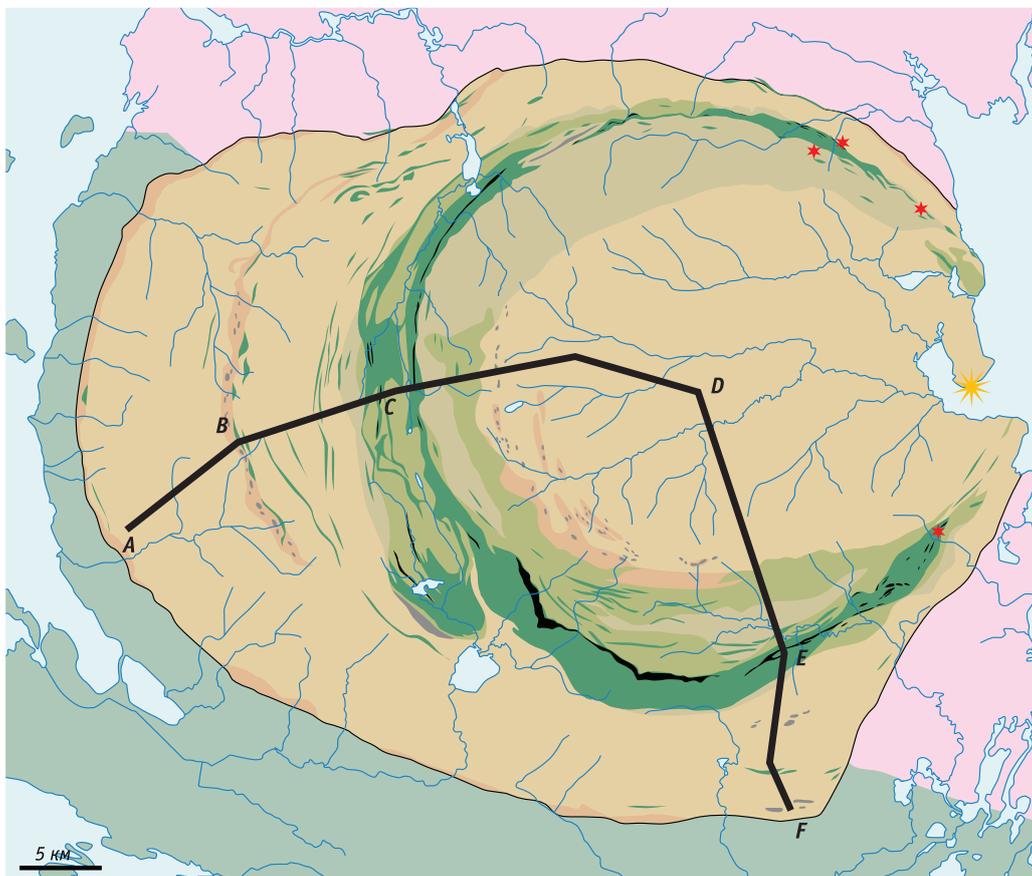


Рис. 6. Схема геологического строения Хибинского массива (Кольский полуостров). 1 – карбонаты, 2 – трубки взрыва, 3 – апатито-нефелиновые породы, 4 – фойидолиты, 5 – пойкилитовые нефелиновые сиениты, 6 – «лявочорриты», 7 – мелкозернистые нефелиновые сиениты и щелочные сиениты, 8 – фойяиты, 9 – ксенолиты, 10 – протерозойский комплекс, 11 – архейский комплекс, 12 – трасса комплексного минералого-геохимического профиля.



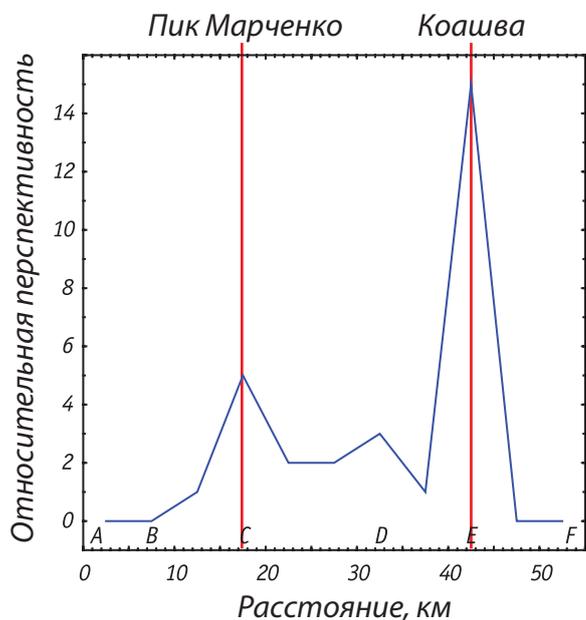


Рис. 7. Относительная перспективность, определенная по профилю А–F (см. рис. 8) с помощью метода многомерных фазовых траекторий.

поздних даек щелочных и щелочно-ультраосновных пород, трубок взрыва, пегматитовых и гидротермальных жил к Главному кольцу. Во внешней части тела фойяитов, кроме того, проявлена еще одна, Малая, полукольцевая зона (до 500 м мощностью) ороговикованных вулканогенно-осадочных пород и фойдолитов [Yakovenchuk et al., 2005].

Результаты изучения петрографической и геохимической зональности Хибинского массива по профилю от его краевой зоны вблизи железнодорожной станции Хибин (точка А на рис. 6) к центру массива на г. Вантомнюк (точка D) и далее через месторождение Коашва (точка E) к контакту с вмещающими породами у подножья г. Китчапак (точка F) [Yakovenchuk et al., 2005; Коноплева и др., 2005; 2006; Михайлова и др., 2006; Иванюк и др., 2006; Калашников и др., 2006; Коноплева и др., 2008; Яковенчук и др., 2008] были проанализированы методом многомерных фазовых траекторий, что в итоге дало картину перспективности различных отрезков профиля (рис. 7). Подчеркнем, что в этом эксперименте мы анализировали только данные о составе фойяитов, – таковые рихорритов, мельтейгит-

уртитов и апатито-нефелиновых пород не учитывались.

Как видно, предлагаемый метод точно указал на крупнейшее в мире апатитовое месторождение Коашва. Другой, много меньший максимум соответствует апатитовому рудопроявлению на пике Марченко. Таким образом, можно заключить, что этот метод позволяет не только выделить перспективные участки, но также предсказать масштаб оруденения.

Байкальская золотоносная провинция

Анализировались результаты детальных геохимических работ на участке Келяна, расположенном в водосборном районе одноименной реки на южных склонах Северо-Муйского хребта (Баунтовский район Бурятии). В пределах этого участка, сложенного, в основном, протерозойскими метаморфическими породами и кембрийскими вулканогенно-осадочными толщами, известно Келянское месторождение ртути, два коренных рудопроявления золота, рудопроявление меди и полиметаллов (рис. 8). Обработка данных о содержании 24 элементов предлагаемым методом позволила установить, что Келянское месторождение ртути приурочено к зоне наивысшей когерентности переменных. Участки с менее интенсивными максимумами включают все известные рудопроявления цветных металлов и золота, а, кроме того, указывают на перспективность еще нескольких районов рассматриваемой территории.

Выводы

Формирование месторождений и рудопроявлений различных полезных ископаемых посредством самоорганизации минеральных систем обуславливает четкую приуроченность концентраций полезных ископаемых к участкам с наивысшей пространственной когерентностью самых разных переменных (в идеале – подавляющего их большинства). Предложенный метод оказался эффективным для изучения геологических объектов самой разной природы и для разных типов полезных ископаемых: апатита, ртути, цветных и благородных металлов. Полученные результаты дают нам основания рассматривать предлагаемый метод как универсальный. Для дальнейшего развития метода было бы интересно апробировать его на рудных месторождениях осадочного генезиса и на месторождениях углеводородов.

Кроме того, когерентность переменных позволяет использовать для прогноза не только данные достаточно дорогостоящих геохимических работ, но и средние (либо даже теоретические) составы или свойства горных пород, присутствующих на геологической карте рассматриваемой территории (как мы это сделали на Оленегорском месторождении). Отсюда же вытекает возможность выделения удобных индикаторов оруденения, позволяющих при работе на однотипных объектах обходиться вовсе без какого-либо геохимического опробования (виртуального или реального). Например, для Кольской

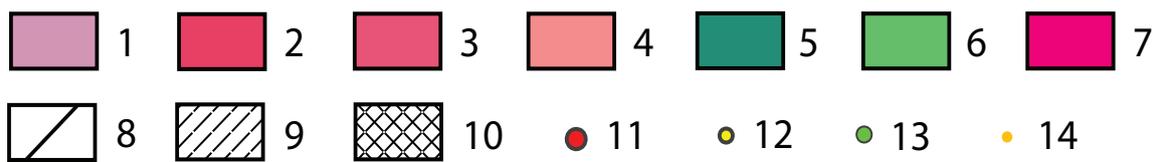


Рис. 8. Схема геологического строения участка Келяна (Забайкальская золотоносная провинция). 1 – нелиндская серия AR2nl (амфиболитовые и биотитовые сланцы, метапесчаники, мраморы, кварциты, метадиабазы, дациты, липариты), 2 – келянская серия PR1-1kl (базальты, дациты, липариты, туфы, песчаники, филлиты, известняки, амфиболиты), 3 – шумнинская свита PR1-2 шм (песчаники, конгломераты, медистые аргиллиты, филлиты), 4 – мамаканская толща Vmm (красноцветные песчаники, аргиллиты, серые мергели и доломиты), 5 – янгудская свита E2jan (доломиты), 6 – муйский комплекс εR1m (габбро), 7 – муйский комплекс γR1m (граниты), 8 – тектонические границы; 9–10 – перспективные участки выделенные с помощью метода фазовых траекторий: 9 – менее, 10 – более перспективные; 11–14 известные рудные объекты: 11 – Келянское месторождение ртути, 12 – коренное рудопроявление золота, 13 – рудопроявление меди, 14 – шлиховые пробы, содержащие знаки золота и киновари.

железорудной провинции таким индикатором является состав магнетита – чем выше в нем содержание алюминия, тем меньше запасы руды (рис. 9). Для хибинских месторождений аналогичный прогноз можно сделать как по составу апатита (чем больше в нем стронция, тем мельче рудопроявление), так и вообще любого «сквозного» минерала (Yakovenchuk et al., 2005).

Таким образом, в предлагаемом методе четко вырисовывается ряд преимуществ по сравнению с традиционными подходами к интерпретации данных геохимических работ:

1. Эффективность. Проведенные исследования демонстрируют высокую эффективность метода: во всех случаях он позволил выделить рудные объекты (рудоконтролирующие структуры, месторождения, рудопроявления).

2. Малая затратность. Метод позволяет обнаруживать новые объекты без проведения весьма дорогостоящих полевых работ, пересматривая уже имеющиеся данные геохимической или даже геологической съемки;

3. Универсальность. Успехи апробации метода на объектах разной геологической природы позволяет заключить, что его эффективность не зависит ни от генезиса, ни от возраста, ни от масштаба изучаемого объекта, т.е. метод является универсальным и его можно использовать для поисков рудных объектов любого типа.

Стоит отметить, что метод многомерных фазовых траекторий является частью цельной прогнозно-

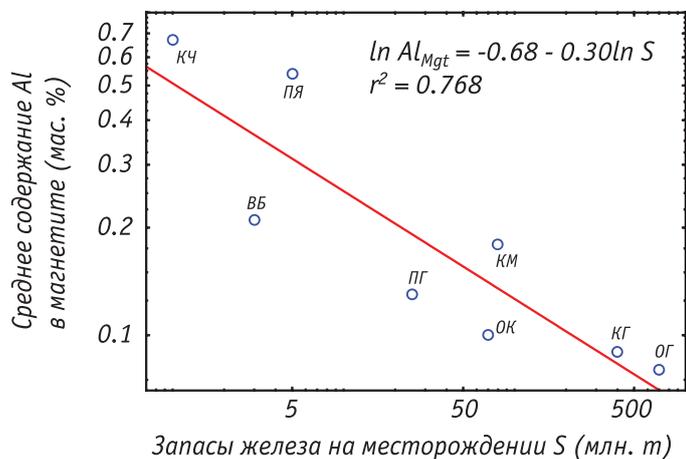


Рис. 9. Зависимость содержания Al в составе магнетита от общих запасов железа на соответствующем месторождении ПЖФ Кольского полуострова: ОГ – Оленегорском, КГ – Кировогорском, ОК – им. 15-летия Октября, КМ – Комсомольском, ПГ – Печегубском, ПЯ – Пинкельярском, ВБ – Восточно-Большелицком, КЧ – Кичанском.

поисковой технологии, основанной на свойствах диссипативных структур [Калашников, 2008а]. Для его развития в дальнейшем необходимо расширить генетический спектр геологических систем (в первую очередь, это касается осадочных месторождений, в том числе, нефтяных и газовых), а также точнее описать граничные условия его применимости.

Благодарности

Исследования выполнялись при финансовой поддержке МЦГК «Геокарт» и ООО «Минералы Лапландии». Авторы признательны А.В.Базай за сотрудничество при изучении золотосеребряной минерализации, Н.В. Межеловскому («Геокарт»), В.А. Килипко (ИМГРЭ), В.Н. Яковенчуку, Н.Г. Коноплевой и Я.А. Пахомовскому (ГИ КНЦ РАН, ООО «Минералы Лапландии») – за предоставленные материалы и обсуждение полученных результатов.

Список литературы

- Базай А.В., Иванюк Г.Ю. Золотосеребряная минерализация околорудных скарноидов Оленегорского месторождения. // Минералогия во всем пространстве сего слова. Труды III Ферсмановской научной сессии, посвященной 50-летию Кольского отделения Российского минералогического общества. Апатиты: Изд-во К&М, 2006. 102-105.
- Базай А.В., Иванюк Г.Ю. Механо-химическая дифференциация железистых кварцитов с позиций теории самоорганизации // ЗВМО. 1996. № 5. С. 67–82.
- Голиков Н.Н., Горяинов П.М., Иванюк Г.Ю., Яковенчук В.Н., Пахомовский Я.А. Золотоносность железистых кварцитов Оленегорского месторождения (Кольский полуостров, Россия) // Геология рудных месторождений. 1999. Т. 41. №2. С. 162-170.
- Горяинов П.М., Иванюк Г.Ю. Самоорганизация минеральных систем. – М.: ГЕОС, 2001. 312 с.
- Егоров Д.Г., Иванюк Г.Ю. Складкообразование в докембрийских железорудных системах как детерминированно-хаотический процесс // Физика Земли. 1996. №1. С. 16-29.
- Жданов В. В., Малкова Т. П. Железорудные месторождения зон региональной базификации (петрология и вопросы генезиса). – Ленинград: Недра, 1974. 198 с.
- Иванюк Г.Ю., Базай А.В., Пахомовский Я.А., Яковенчук В.Н., Горяинов П.М. Низкотемпературные гидротермальные жилы в породах архейской железорудной формации Кольского полуострова // ЗВМО. 2001. № 3. С. 16–28.
- Иванюк Г.Ю., Горяинов П.М. Структурно-вещественная зональность и условия образования Восточно-Большелицкого рудопроявления железистых кварцитов (Кольский полуостров) // ЗРМО. 2007. № 6. С. 1–17.
- Иванюк Г.Ю., Пахомовский Я.А., Коноплева Н.Г., Яковенчук В.Н., Меньшиков Ю.П., Корчак Ю.А. Минералы группы шпинели в породах Хибинского щелочного массива (Кольский полуостров) // ЗРМО. 2006. № 5. С. 64–75.
- Калашников А.О. Прогноз и поиск месторождений по степени структурно-вещественной упорядоченности участков земной коры // Разведка и охрана недр, 2, 2008а. С. 9-13.
- Калашников А.О. Степень дифференцированности геохимического поля как поисковый признак // Разведка и охрана недр, 3, 2008б. С. 34-40.
- Калашников А.О., Селиванова Е.А., Квятковская М.И., Коноплева Н.Г., Пахомовский Я.А. Зональность Хибинского фойяитового массива по данным изучения калиевых полевых шпатов // Труды III Ферсмановской научной сессии. Апатиты: Изд. К&М, 2006. С. 121–123.
- Коноплева Н.Г., Иванюк Г.Ю., Пахомовский Я.А., Яковенчук В.Н., Меньшиков Ю.П., Корчак Ю.А. Амфиболы Хибинского щелочного массива // Труды III Ферсмановской научной сессии. Апатиты: Изд.

K&M, 2006. С. 124–127.

Коноплева Н.Г., Иванюк Г.Ю., Пахомовский Я.А., Яковенчук В.Н., Михайлова Ю.А., Горяинов П.М. Минеральная зональность фойяитов Хибинского массива по профилю от ст. Хибины до г. Рып-нецк // Труды II Ферсмановской научной сессии. Апатиты: Изд. “К&М”, 2005. С. 116–119.

Михайлова Ю.А., Коноплева Н.Г., Яковенчук В.Н., Иванюк Г.Ю., Меньшиков Ю. П., Пахомовский Я. А. Минералы группы корунда в породах Хибинского щелочного массива (Кольский полуостров) // ЗРМО. 2006. № 6. С. 41–54.

Николаев А.П., Горяинов П.М. Квазипериодические явления в метаморфических породах как отражение их упорядоченности строения (на примере железорудных ассоциаций Кольского полуострова) // Геология и геофизика, 1990. № 11. С. 86–93.

Розенблюм И. С., Калинин А. И., Макурин В. Н., Яранцева Л. М., Болдырев М. В. Новый тип золото-серебряных месторождений на Северо-Востоке России // Сов. Геология. 1992. № 4. С. 17 – 26.

Шаблинский Г.Н. К вопросу о глубинном строении Хибинского и Ловозерского плутонов // Труды Ленинградского общества естествоиспытателей. 1963. Т. 74. С. 41–43.

Яковенчук В.Н., Иванюк Г.Ю., Пахомовский Я.А., Меньшиков Ю.П., Коноплева Н.Г., Корчак Ю.А. Пироксены Хибинского щелочного массива (Кольский полуостров, Россия) // ЗРМО. 2008. № 2. С. 96–113.

Goryainov P.M., Ivanyuk G.Yu. On genesis of banded iron-formation of the Kola peninsula. Synergetic aspects // Theophrastus' contributions to advanced studies in geology. Vol. II. Theophrastus Publications A. E., Athens, 1998. P. 249–267.

Yakovenchuk V.N., Ivanyuk G.Yu., Pakhomovsky Ya.A., Men'shikov Yu.P. (Ed. F. Wall). Khibiny. – Laplandia Minerals, Apatity, 2005. 467 p.