

УДК 550.42:553.411

ВИХРЕВАЯ ПРИРОДА РУДОГЕННЫХ ГЕОХИМИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

В.Г. Ворошилов

Томский политехнический университет

E-mail: v_g_v@tpu.ru

Предложена модель формирования структуры рудогенного геохимического поля, обоснована ее взаимосвязь с масштабностью оруденения. На примере гидротермальных золоторудных месторождений показана вихревая структура аномальных геохимических полей различных иерархических уровней, обусловленная конвективно-вихревым характером движения гидротермальных флюидов, сопряженностью их восходящих и нисходящих потоков, выщелачиванием и переотложением химических элементов. Установлена пространственная взаимосвязь геохимических аномалий с выявляемыми на космоснимках кольцевыми структурами.

Ключевые слова:*Аномальное геохимическое поле, гидротермальные месторождения, кольцевые структуры, зональность.***Key words:***Anomalous geochemical field, hydrothermal deposits, ring structures, zonality.*

Гидротермальные рудные месторождения, согласно современным представлениям, в большинстве случаев являются результатом сложного взаимодействия мантийно-коровых процессов. Флюиды глубинных частей гидротермальных систем, как правило, являются надкритическими. Обогащение их рудными компонентами на этом уровне возможно в случае формирования в астеносферном канале комплексного физико-химического барьера (термобарического сепаратора, по [1]). Смена термодинамических обстановок на больших глубинах происходит достаточно медленно, поэтому реализация такого сценария обеспечивает мощный и долговременный поток металлонесных флюидов, что является одним из условий формирования крупных и гигантских месторождений. Разгрузка флюидных потоков в вышележащие горизонты происходит по зонам глубинных разломов.

Попадая в гидросферу, восходящие надкритические флюиды конденсируются и стягиваются к зонам повышенной проницаемости, вдоль которых они мигрируют вверх по разрезу, нагревая по пути поровые растворы вмещающих пород, вследствие чего последние становятся неравновесными с вмещающей средой и выщелачивают из пород Fe, Co, Ni, Cr, V (микроэлементы темноцветных минералов, подвергающихся изменениям в первую очередь). С течением времени потоки поровых флюидов, встречая различные препятствия, распадаются на отдельные струи, часть из которых вновь опускается вниз. Вследствие охлаждения растворов на нисходящих ветвях конвективных ячеек происходит обратное осаждение вышеуказанных элементов в виде примесей в породообразующих минералах и сульфидах (рис. 1).

На восходящих ветвях конвективных ячеек поровые растворы постепенно смешиваются с ювенильными флюидами и из последних происходит осаждение рудных компонентов в последовательности, стандартной для гидротермальных месторождений, в частности, золоторудных: вначале Fe, As, Co в виде пирита и арсенопирита, затем Cu, Pb, Zn, Ag в виде полисульфидного комплекса и, наконец, теллуриды и сульфосоли (Te, Bi, Ag). Совокуп-

ность перечисленных геохимических ассоциаций составляет ядерную зону аномальной структуры геохимического поля (АСГП) ранга месторождения. Золото присутствует во всех трех ассоциациях, но максимальные его концентрации характерны для участков их пространственного совмещения. Условие реализуется при высокой степени унаследованности рудовмещающих структур. Этот же фактор благоприятствует дифференциации ядерной и фронтальной зон, то есть, возрастанию структурной упорядоченности АСГП.

Вследствие регрессивного характера гидротермального процесса, зональность аномального геохимического поля имеет концентрический (сходящийся) характер. Зона фронтального обогащения АСГП представлена совокупностью рудопроявленных и зон рассеянной минерализации, приуроченных к менее благоприятным для концентрации оруденения тектоническим структурам. Соответственно, структурная упорядоченность АСГП здесь выражена гораздо слабее, а в зонах рассеянной минерализации практически не проявлена (рис. 1). Таким образом, масштабность оруденения и структурная упорядоченность АСГП (которая может быть вычислена количественно [2]) парагенетически связаны друг с другом.

Важнейший момент, которому исследователи до сих пор уделяют незаслуженно малое внимание — наличие вихревых структур в строении аномальных геохимических полей. Начатые с работ Ли Сы Гуана [3] и наиболее интенсивно проводившиеся во всем мире в 70–80 годы XX века, систематические исследования вихревых и кольцевых тектонических структур, выявили очень широкое их развитие во всех структурах Земли. Было установлено, что по генезису кольцевые и вихревые структуры могут быть тектоногенными, плутоногенными, вулканогенными, метаморфогенными, экзогенными, ударно-метеоритными (астроблемы). Рудоносность их различна, но известно, что не менее 70...75 % всех известных на Земле месторождений полезных ископаемых пространственно ассоциируют с кольцевыми структурами.

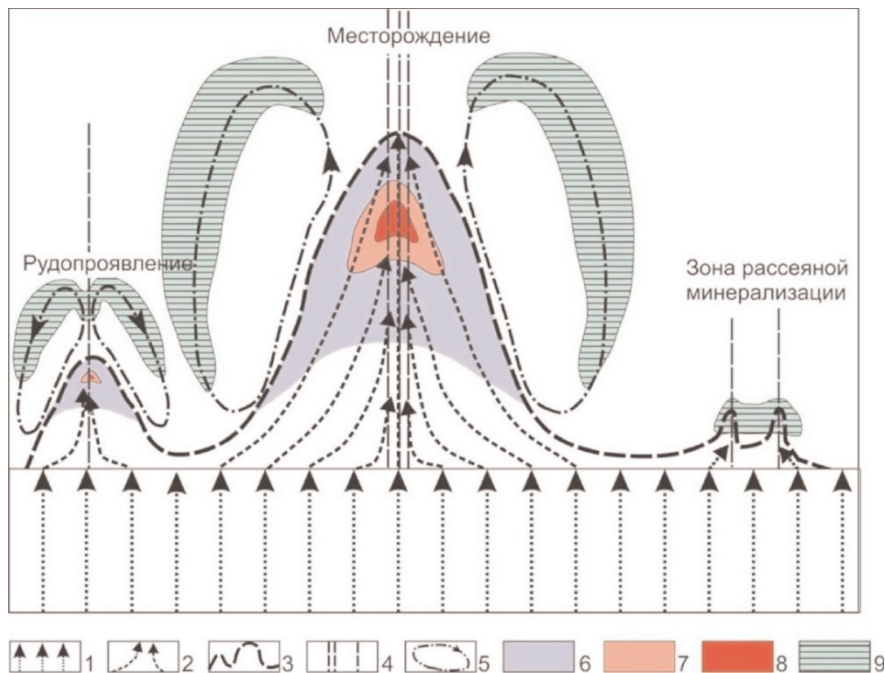


Рис. 1. Модель формирования аномального геохимического поля золотогенерирующей эндогенной термофлюидной системы: 1) поток надкритических флюидов; 2) гидротермальные растворы; 3) фронт движения ювенильных гидротермальных растворов; 4) разрывные нарушения; 5) конвекция в местных поровых флюидах; области развития геохимических ассоциаций: 6) Fe, As, Co, Au; 7) Cu, Pb, Zn, Au, Ag; 8) Au, Te, Bi, Ag; 9) Fe, Ni, Co, Cr, V

Установлено, что определенным генетическим типам кольцевых структур соответствует свой набор полезных ископаемых. Выявлено также, что наиболее благоприятны для локализации рудных веществ: 1) периферические контуры кольцевых структур; 2) окаймляющие структуру складчатые пояса; 3) зоны пересечения кольцевых структур с пересекающими их разломами различных рангов и размеров; 4) области интерференции кольцевых структур разного размера и различного генезиса; 5) апикальные части plutонов, отраженных в виде кольцевых структур [4].

Другими словами, определяющим фактором служит степень проницаемости земной коры, обусловленная ее раздробленностью. Этим же фактором контролируется движение рудоносных гидротермальных растворов, поэтому представляется очевидным, что строение аномальных геохимических полей должно отражать вихревую структуру тектонического каркаса. Более того, поскольку скорость движения растворов многократно выше, чем тектонических блоков, вихревая (концентрически зональная) структура в размещении гидротермальных образований при благоприятных условиях должна проявляться очень ярко.

Принципиальная возможность возникновения подобных вихрей обусловлена восходящим (или нисходящим) движением потоков гидротермальных растворов на фоне вращения Земли вокруг своей оси. По закону Кориолиса, в зоне восходящих конвективных потоков, вследствие падения давления по мере приближения к дневной поверхности, растворы формируют вихри циклоническо-

го типа, вращающиеся в южном полушарии по часовой стрелке, а в северном — против нее. В зоне нисходящих конвективных потоков картина обратная, здесь возникают вихри-антициклоны, вращающиеся в северном полушарии по часовой стрелке, а в южном — против нее.

Идеально круглая форма кольцевых структур, в том числе, сопровождающих магматические тела самой разнообразной морфологии, требует своего объяснения. По нашему мнению, магматогенные кольцевые структуры в большинстве случаев являются вещественным выражением вихревого движения потоков флюидов и, соответственно, различий в геохимических особенностях внешне однородных пород, характере растительности, особенностях рельефа, спектральных характеристиках пород, — то есть, всего того, что способствует проявлению этих структур на космических снимках.

Исходя из этого, все термофлюидные системы должны сопровождаться кольцевыми структурами, причем достаточно обычным должно быть соседство вложенных и сателлитных колец, связанных с сопряженными восходящими и нисходящими потоками флюидов.

Выявление вихревой структуры в строении аномального геохимического поля — не простая задача, вследствие формирования таких полей по принципу суперпозиции на фоне пространственного совмещения тектонических структур различного возраста и генезиса. Тем не менее, в благоприятных условиях вихревая структура минерально-геохимических полей рудоносных объектов проявляется очень контрастно, что способствует более объек-

тивному прогнозу оруденения и оценке масштабов выявляемых рудных объектов. На рис. 2 приведен пример структуры аномального геохимического поля, сопровождающего золото-скарновое оруденение Фаифановского месторождения Синюхинского рудного поля (Горный Алтай).

Оруденение Синюхинского рудного поля связано с золото-сульфидной минерализацией, наложенной на субпластовые инфильтрационные скарны, развивающиеся на контактах известняков и вулканитов в зоне термического воздействия интрузивов нижнедевонского синюхинского диорит-тоналитового комплекса. Зональность инфильтрационных скарнов развивается относительно зон повышенной проницаемости (участков сопряжения трещин различного направления, полостей отслоения в замках складок и т. д.). В наиболее тектонически нарушенных участках развиваются властонитовые разности скарнов с борнит-халькозиновой минерализацией, теллуридами, сульфосолями и максимальными концентрациями золота, основная часть скарновых залежей сложена гранатом с наложенным халькопиритом, иногда с редкой вкрапленностью тетраэдрита, галенита, сфалерита, пирита, арсенопирита.

По периферии залежей развиты пироксеновые скарны, где преобладает сопряженный со скарнированием магнетит, реже встречается пирит. Промышленная золотоносность характерна для контуров развития борнит-халькозиновой минерализации, реже халькопиритовой. Геохимическая зональность отражает минералогическую: рудные

столбы фиксируются в концентрически зональной аномальной структуре геохимического поля ассоциацией Au, Ag, Cu, Bi, Te, для их периферии характерно накопление Cu, As, Pb, Zn, Mn (халькопирит, галенит, сфалерит, арсенопирит, родонит), а за пределами рудных тел и вдоль рудоконтролирующих структур развиты аномалии Fe, Co, Ni, Cr (магнетит, пирит).

Фаифановское месторождение приурочено к рифовому (биогермному) массиву известняков мощностью до 600 м в толще вулканитов андезибазальтового состава. Изометричная форма рифового массива, смятого в антиклинальную складку при внедрении гранитоидов, его надинтрузивная позиция, способствовали формированию вихревой структуры движения гидротермальных растворов снизу вверх против часовой стрелки. Центральная (ядерная) часть аномальной структуры геохимического поля ранга месторождения приурочена к сопряжению двух основных разрывных нарушений. Относительно этой наиболее проницаемой области сформировалась концентрическая структура с вышеописанной минерально-геохимической зональностью. Она дополнительно осложнена локальными вихрями, соответствующими рудопроявлениям, приуроченным к зонам проницаемости второго порядка.

Примечательно, что золото-сульфидная минерализация отлагается в центральных частях вихревых воронок, где скорость движения и степень смешивания ювенильных и местных флюидов максимальна. Аномалии Fe, Co, Ni, Cr, Mn на перифе-

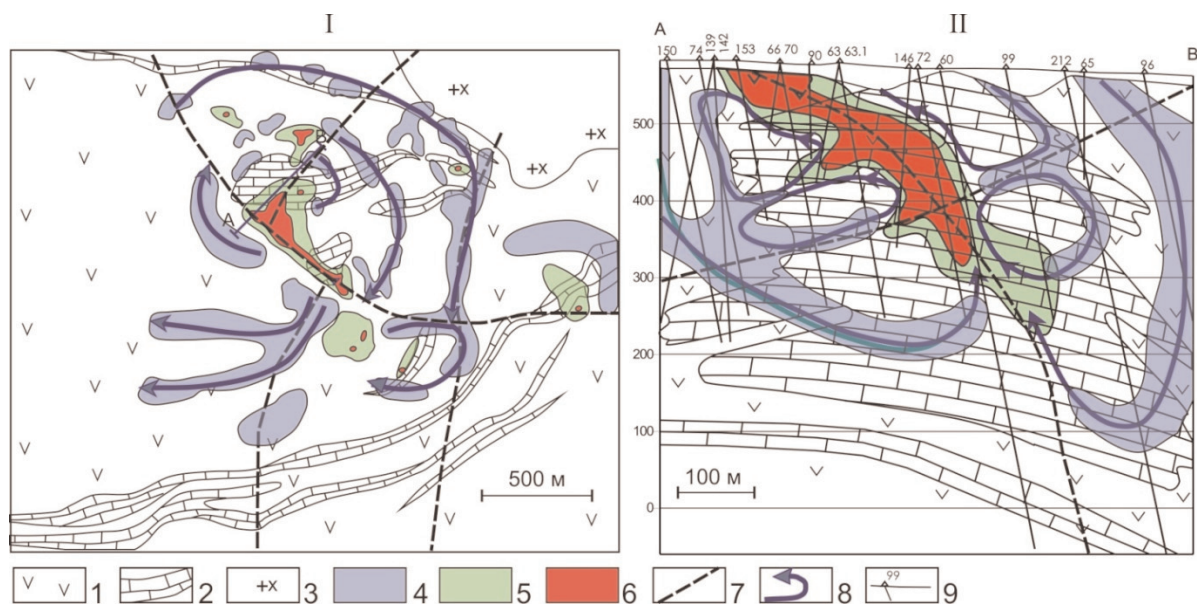


Рис. 2. Вихревая структура минерально-геохимического поля Фаифановского месторождения Синюхинского рудного поля в Горном Алтае (по материалам Горно-Алтайской поисково-съёмочной экспедиции и рудника Веселого): I) план; II) разрез по линии АВ; 1) толща андезибазальтов, андезитов и их туфов; 2) мраморизованные известняки; 3) гранодиориты; распределение гидротермальных минеральных комплексов и геохимических ассоциаций по данным детального геолого-геохимического и геофизического картирования (в скобках второстепенные минералы): 4) магнетит, (пирит, родонит), аномалии Fe, Co, Ni, Cr, Mn; 5) халькопирит, пирит, (галенит, сфалерит, арсенопирит), аномалии Cu, Zn, Pb, As; 6) борнит, халькозин, золото, теллуриды и сульфосоли, аномалии Cu, Au, Ag, Bi, Te; 7) рудоконтролирующие разрывы; 8) вихревое движение нагреваемых поровых растворов; 9) буровые скважины и их номера

рии вихревых структур обусловлены, видимо, заимствованием этих элементов из вмещающих вулканитов нагревающимися и движущимися поровыми флюидами, которые до начала скарново-рудного процесса находились в химическом равновесии с вмещающими породами.

Приуроченность магнетита к периферии зон проницаемости, в сочетании с вихревой формой геофизических и минералогических аномалий, свидетельствует о выщелачивании Fe (а также Co, Ni, Cr, Mn) из вмещающих пород и формировании магнетита, пирита, родонита на нисходящих ветвях конвективных систем. Особенно показательно поведение Mn, выщелачиваемого из карбонатов: он существенно преобладает в составе указанной ассоциации только в тех конвективных ячейках, которые целиком находятся в массиве известняков. Разномасштабные вихревые структуры отчетливо фиксируются как в плане, так и в разрезе месторождения (рис. 2).

Можно предположить, что в верхнерудно-надрудной части термофлюидной системы, где происходит рассеяние потока ювенильных флюидов, часть привнесенного ими вещества, в том числе Au, могут осаждаться и на восходящих и на нисходящих ветвях конвективных систем, что можно использовать как дополнительный критерий верхнерудного среза оруденения. Такая ситуация, действительно, достаточно часто встречается на практике. Рис. 3 иллюстрирует подобный пример распределения золота на сопряжении двух кольцевых структур на одном из золоторудных проявлений Енисейского Кряжа (здесь и далее дешифрирование космоснимков выполнено доцентом ТПУ Ю.С. Ананьевым).

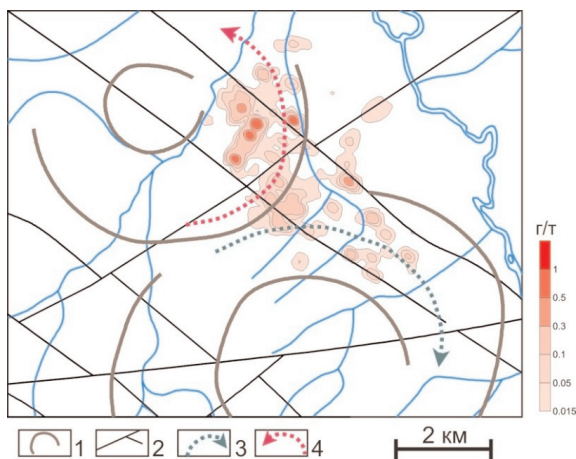


Рис. 3. Распределение золота на сопряжении двух кольцевых структур (участок Иочиминский, Енисейский Кряж, по материалам ЦГИ «Прогноз», г. Красноярск): 1) кольцевые структуры; 2) линейные элементы, интерпретируемые как рудоконтролирующие разрывы; направления движения флюидов: 3) нисходящих; 4) восходящих

Таким образом, соседство восходящих и нисходящих вихревых потоков флюидов — характерный признак рудогенных гидротермальных систем.

Во многих случаях такое соседство уверенно расшифровывается не только в первичных, но и во вторичных геохимических полях. Это касается, прежде всего, объектов крупного ранга: рудных полей, узлов, районов, обладающих сходной морфологией первичных и вторичных полей.

Связь с кольцевыми структурами строения вторичного аномального геохимического поля ранга рудных районов, узлов и полей можно проиллюстрировать результатами геохимического картирования Гаринско-Чапской площади Енисейского Кряжа.

АСГП ранга рудного района представляет собой совокупность аномалий элементов, перераспределение которых связано с воздействием масштабного вещественно-энергетического источника (рис. 4).

В структуре аномального геохимического поля на первый план здесь выходят не прямые спутники золота, а элементы, фиксирующие масштабные процессы метаморфогенного, магматогенного, тектоногенного или иного генезиса. Ядерная часть описываемой АСГП, пространственно приуроченная к кольцевой структуре, сложена ассоциацией Ba, Be, Y и окаймляется перемежающимися кольцевыми аномалиями ассоциаций Ba, Be, Y и Mo, V, Ag, Cu. Общий диаметр кольцевой структуры, контролирующей размещение этих аномалий составляет около 30 км. Фрагмент подобной структуры картируется и в южной части площади, но здесь проявлена только ассоциация Ba, Be, Y. Эта часть территории более эродирована, поэтому можно полагать, что комплекс Mo, V, Ag, Cu характерен для верхнерудного среза района.

Дальнейшее развитие процесса сопровождается появлением палингенных гранитов гаринского комплекса, которые фиксируются в геохимическом поле ассоциацией Sn, B, Pb и обнажаются преимущественно в южной части площади. В северной части района указанная ассоциация маркирует надинтрузивные зоны и пространственно ассоциирует с зонами пропилитизации.

Сюда же тяготеют аномалии золота, его месторождения и рудопроявления, фиксирующие завершающий этап гидротермального процесса, что указывает на парагенетический характер связи золота с палингенными гранитами и интрателлурический (вероятнее всего, мантийный) источник металла. Зона фронтального обогащения АСГП ранга рудных узлов и полей представлена совокупностью рудопроявлений и зон рассеянной минерализации, приуроченных к менее благоприятным для концентрации оруденения тектоническим структурам. Они маркируются комплексными аномалиями выщелоченных из вмещающих пород и переотложенных элементов (Co, Ni, Mn). Вышеуказанные ассоциации приурочены к кольцевым структурам диаметром около 10 км, которыми контролируются АСГП ранга рудных полей. Совокупность 3–4 сближенных структур такого диаметра образуют рудный узел (рис. 4).

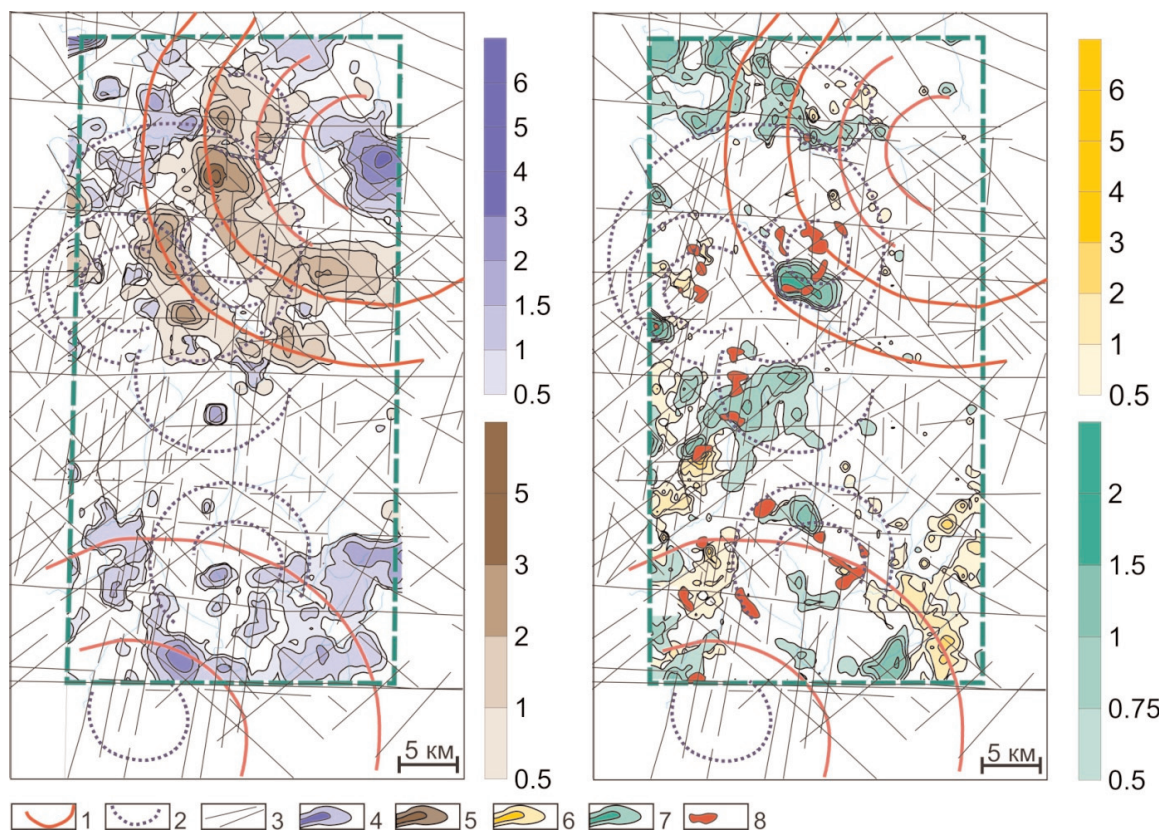


Рис. 4. Распределение геохимических ассоциаций во вторичном геохимическом поле Гаревско-Чапковской площади, Енисейский Кряж (по материалам ОАО «Красноярская горно-геологическая компания»): кольцевые структуры: 1) ранга рудных районов; 2) ранга рудных узлов и полей; 3) линейменты, трактуемые как разрывные нарушения; геохимические ассоциации (в изолиниях значений факторов): 4) Mo, V, Ag, Cu; 5) Ba, Be, Y; 6) Sn, B, Pb; 7) Co, Ni, Mn; 8) генерализованные аномалии Au, в г/т

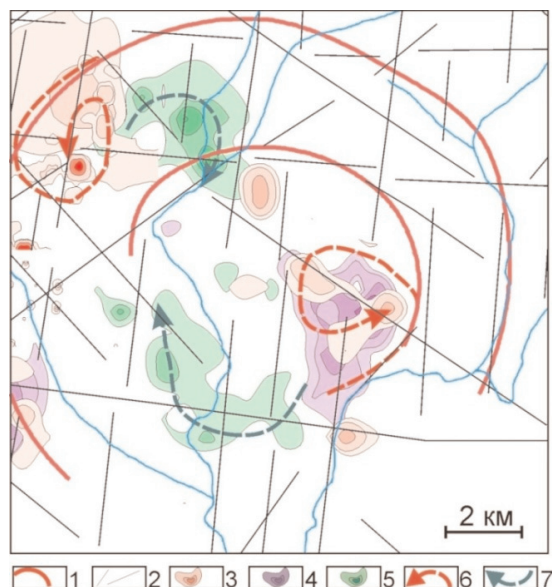


Рис. 5. Распределение геохимических ассоциаций в вихревых структурах рудного поля Оленка, Енисейский Кряж (по материалам ОАО «Красноярская горно-геологическая компания»): 1) кольцевые структуры; 2) линейменты, трактуемые как разрывные нарушения; аномалии: 3) Au; 4) As; 5) Co-Ni-Mn-Li-Zn-Cu; 6) движение растворов на восходящих ветвях конвективных термофлюидных систем; 7) движение поровых растворов на нисходящих ветвях конвективных систем

Влияние более поздних интрузивных комплексов на золотое оруденение неоднозначно. Непосредственно в интрузивах и их контактовой зоне концентрированное оруденение, как правило, не обнаруживается, отмечаются лишь достаточно слабые аномалии золота и мышьяка, что можно расценивать как их перераспределение и вынос за пределы контактовой зоны. На некотором удалении от интрузий (до первых километров) этот процесс перераспределения может привести к существенному обогащению ранее возникших рудопоявлений.

На рис. 5 приведен пример проявления в геохимическом поле конвективных ячеек ранга рудного поля. АСГП рассматриваемой площади контролируется кольцевой структурой диаметром около 10 км.

Характерна пространственная сопряженность аномалий золота, мышьяка, связанных с восходящими рудоносными флюидами и комплексных аномалий Co, Ni, Mn, Li, Zn, Cu, интерпретируемых как осаждение выщелоченных из пород элементов на нисходящих ветвях термофлюидных систем. Отчетливо виден вихревой характер движения флюидов – против часовой стрелки для восходящих потоков и по часовой стрелке – для нисходящих. И восходящие и нисходящие потоки приурочены к узлам сопряжения разломов различных направлений в пределах кольцевой структуры.

В целом, модель формирования аномального геохимического поля ранга рудного района можно представить в следующем виде. На раннем этапе подъема потока интрателлурических флюидов происходит привнос и зональное перераспределение комплекса элементов, сопровождающееся масштабным изменением вмещающих пород, которое часто трудно отличить от регионального метаморфизма, в связи с чем ряд исследователей считают генезис оруденения метаморфогенным. На наш взгляд, основной источник золота — мантийный. Его функционирование оптимально описывается моделью глубинного термобарического сепаратора, предложенной И.И. Абрамовичем [1]. Отложение золота происходит после завершения палингенного плавления, а при последующих интрузивных процессах оно преимущественно перераспределяется, но может и частично привноситься, если интрузивная деятельность парагенетически связана с рудогенным процессом. Видимо, нет оснований противопоставлять магматический и интрателлурический источники золота. Оба они имеют место, но интрателлурическая (мантийная) составляющая является доминирующей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абрамович И.И. Геодинамика и мантийные корни рудных формаций. — М.: ВСЕГЕИ, 1998. — 140 с.
2. Ворошилов В.Г. Аномальные структуры геохимических полей гидротермальных месторождений золота: механизм формирования, методика геометризации, типовые модели, прогноз масштабов оруденения // Геология рудных месторождений. — 2009. — Т. 51. — № 1. — С. 3—19.

Выводы

Месторождения гидротермального генезиса сопровождаются концентрически зональными аномальными геохимическими полями. Их структурная упорядоченность парагенетически связана с масштабностью оруденения.

Установлена вихревая структура рудогенных аномальных геохимических полей различных иерархических уровней, обусловленная конвективно-вихревым характером движения гидротермальных флюидов. Гидротермальные системы имеют причинно-следственную связь с выявляемыми на космоснимках кольцевыми структурами.

Сопряженность восходящих и нисходящих вихревых потоков флюидов — характерное свойство рудогенных гидротермальных систем. В геохимическом поле эта зависимость выражается в закономерном пространственном сочетании ассоциаций элементов, участвующих во взаимосвязанных процессах рудоотложения, выщелачивания и перетолжения.

Работа выполнена в рамках Государственного задания «Наука» № 5.4730.2011.

3. Ли Сы-гуан. Вихревые структуры Северо-Западного Китая. — М.-Л.: Госгеолтехиздат, 1958. — 130 с.
4. Вихри в геологических процессах / Ред. А.В. Викулин. — Петропавловск-Камчатский: Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, 2004. — 297 с.

Поступила 12.05.2012 г.