

## РУДОГЕННЫЕ ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ПОЛЯ И КОЛЬЦЕВЫЕ СТРУКТУРЫ

**Ворошилов В.Г.**

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск,  
e-mail: v\_g\_v@tpu.ru*

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 [Абрамович, 1998]). Смена термодинамических обстановок на больших глубинах происходит достаточно медленно, поэтому реализация такого сценария обеспечивает мощный и долговременный поток металлоносных 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 «местные» 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 этих 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 порообразующих минералах и сульфидах.

На восходящих ветвях конвективных ячеек «местные» растворы, вследствие действия осмотического эффекта, 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). Совокупность перечисленных геохимических ассоциаций слагает 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. Это условие реализуется при высокой степени унаследованности рудовмещающих структур. Тот 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 рудопроявлений 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. Таким образом, масштабность оруденения и структурная упорядоченность АСГП парагенетически связаны друг с другом [Ворошилов, 2009].

Важнейший момент, которому исследователи до сих пор уделяют незаслуженно малое внимание, – наличие вихревых структур в строении аномальных геохимических полей. Начатые еще в первой половине 20-го века [Ли Сы Гуан, 1958] и наиболее интенсивно проводившиеся во всем мире в 70–80 годы 20-го 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.

Установлено, что определенным генетическим типам кольцевых структур соответствует свой набор полезных ископаемых. Выявлено также, что наиболее благоприятны для локализации рудного вещества: 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 плутонов, отраженных в виде кольцевых структур [Вихри..., 2004].

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 как вихревую структуру тектонического каркаса, так и вихревой характер движения самих гидротерм. 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 циклонического 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 надинтрузивных 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 объективному прогнозу оруденения и оценке масштабности выявляемых рудных объектов.

Ярким свидетельством проявления ротационных процессов в размещении гидротермальной минерализации является структура рудогенного геохимического поля Фаифановского месторождения Синюхинского золоторудного поля в Горном Алтае. 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 волластонитовые 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: золоторудные 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, имеющей явно выраженный вихревой характер. 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. Приуроченность магнетита к периферии зон проницаемости, в сочетании с вихревой (антициклонического типа) формой магнитных 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.

Можно предположить, что в верхнерудно-надрудной части термофлюидной системы, где происходит рассеяние потока ювенильных флюидов, часть привнесенного ими вещества, в том числе Au, может осаждаться и на восходящих и на нисходящих ветвях конвективных систем, что можно использовать, как дополнительный критерий верхнерудного среза оруденения. Такая ситуация, действительно, нередко встречается на практике в участках парного сопряжения кольцевых структур.

Таким образом, соседство восходящих и нисходящих вихревых потоков флюидов – характерный признак рудогенных гидротермальных систем. Во многих случаях такое соседство уверенно расширяется 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 одной из золотоносных площадей Енисейского Кряжа. В ранге рудного района аномальное геохимическое поле представляет здесь совокупность аномалий элементов, перераспределение которых связано с воздействием масштабного вещественно-энергетического источника. В структуре аномального геохимического поля на первый план выходят не прямые спутники золота, а элементы, фиксирующие масштабные процессы метаморфогенного, магматогенного, тектоногенного или иного генезиса. Ядерная часть описываемой АСГП, пространственно пруроченная к кольцевой структуре, сложена ассоциацией Ва, Ве, У и окаймляется перемежающимися кольцевыми аномалиями ассоциаций Ва, Ве, У и Мо, V, Ag, Cu. Общий диаметр кольцевой структуры, контролирующей размещение этих аномалий составляет около 30 км. В наименее эродированных участках площади проявлена только ассоциация Ва, Ве, У, поэтому можно полагать, что комплекс Мо, V, Ag, Cu характерен для верхнерудного среза района.

Дальнейшее развитие процесса сопровождается появлением палингенных гранитов гаринского комплекса, которые фиксируются в геохимическом поле ассоциацией Sn, В, Pb. К этим же участкам 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.

Характерна пространственная сопряженность аномалий Au, As, 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. В размещении указанных ассоциаций отчетливо прослеживается 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.

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

### **Литература**

Абрамович И.И. Геодинамика и мантийные корни рудных формаций. – М.: ВСЕГЕИ, 1998. – 140 с.

Вихри в геологических процессах / Ред. А.В. Викулин. – Петропавловск-Камчатский: Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, 2004. – 297 с.

Ворошилов В.Г. Аномальные структуры геохимических полей гидротермальных месторождений золота: механизм формирования, методика геометризации, типовые модели, прогноз масштабности оруденения // Геология рудных месторождений. 2009. Т. 51. № 1. С. 3-19.

Ли Сы-гуан. Вихревые структуры Северо-Западного Китая. – М.-Л.: Госгеолтехиздат, 1958. – 130 с.