

СЕКЦИЯ 3

ГЕОЛОГИЯ И ГЕНЕЗИС РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ, МИНЕРАГЕНИЯ

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ РЕШЕНИИ ПРОГНОЗНО-ПОИСКОВЫХ ЗАДАЧ В ПРИКЛАДНОЙ ГЕОХИМИИ

Ворошилов В.Г.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

Прикладная геохимия – это область геологических исследований, посвященная применению теоретических законов геохимии для решения задач прогнозирования, поисков, добычи и переработки полезных ископаемых, охраны окружающей среды, агропромышленной сферы и других отраслей человеческой деятельности. Поиски полезных ископаемых, безусловно, являются при этом главной задачей.

Важнейшие понятия прикладной геохимии, с которых начинается процесс прогнозирования и поисков полезного ископаемого – «геохимическое поле», «геохимическая аномалия», «геохимический фон». Согласно общепринятой концепции, при нормальном законе распределения фоновыми считаются содержания элемента, отличающиеся от среднего арифметического (вычисленного по выборке, не содержащей явных аномалий) не более чем на 3 стандартных отклонения (правило 3-х сигм). Наложённые процессы оруденения, проявившиеся на перспективных площадях, ожидаемо нарушают нормальность распределения содержания большинства химических элементов, делая его асимметричным, в большей степени соответствующим логарифмически нормальному (логнормальному) закону распределения. В соответствии с логнормальной моделью правило трех сигм преобразуется в выражение:

$$X_{\text{аном.}} > \bar{X} * \varepsilon^3$$

где $X_{\text{аном.}}$ – аномальное содержание элемента в пробе; \bar{X} – среднее геометрическое (фоновое) содержание элемента в выборке; ε – стандартный множитель.

Для m рядом расположенных аномальных точек уровень аномальности снижается, что позволяет избежать пропуска слабых аномалий, особенно при неблагоприятных ландшафтно-геохимических условиях:

$$X_{\text{аном.}} > \bar{X} * \varepsilon^{3/\sqrt{m}}$$

Любые поисковые работы подразумевают использование результатов всех ранее проведённых геохимических работ. Однако здесь возникает очень сложная проблема несопоставимости ретроспективных геохимических данных разных лет и, тем более, разных лабораторий. Практикуемые иногда способы пересчёта средних значений на единый для всех выборок уровень проблемы не решают, поскольку нестыковки касаются не только средних значений, но и законов распределения в массивах данных.

Нами предлагается способ пересчёта исходных результатов анализов в безразмерные уровни аномальности, позволяющие сравнивать интенсивность геохимических процессов в объектах близких иерархических уровней. Стандартизация данных незаменима также в случае, когда на площади поисков одновременно опробуется несколько разнородных субстратов (например, мох, мелкозём, сколки). В районах развития многолетней мерзлоты необходимость в этом возникает часто.

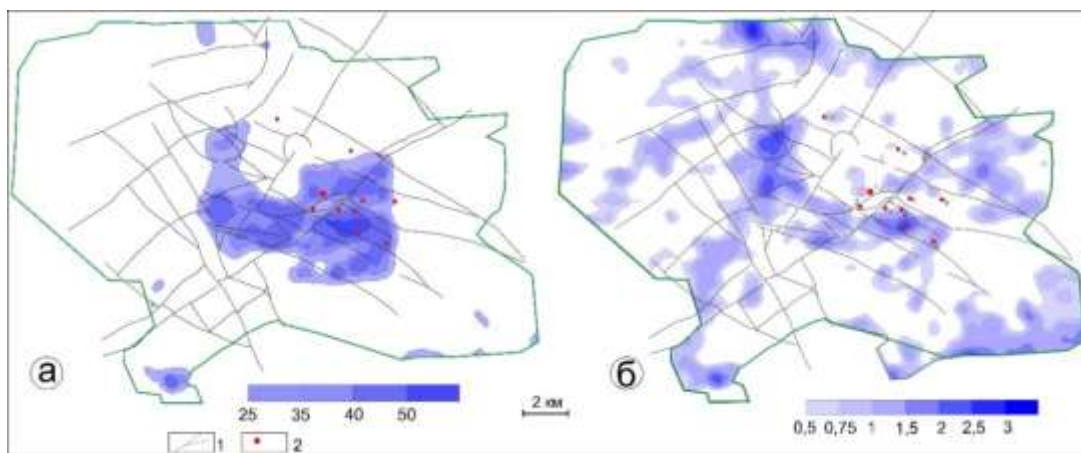


Рис. 1. Содержания Pb во вторичных ореолах Албазинского рудного узла: а – в г/т; б – в безразмерных уровнях аномальности; 1 – основные разрывные нарушения; 2 – золоторудные месторождения

Для логнормальной модели безразмерный показатель аномальности рассчитывается для каждой выборки по формуле:

$$\gamma = \frac{\ln\left(\frac{X}{\bar{X}}\right)}{\ln(\varepsilon)}$$

Различие в содержании сводных геохимических карт при использовании традиционного способа построения изолиний содержаний элемента и предлагаемого нами метода геометризации уровней аномальности наглядно иллюстрирует рисунок 1.

На рисунке изображено распределение свинца во вторичных ореолах Албазинского золоторудного узла (Хабаровский край). Нетрудно заметить, что аномалии Pb в исходных единицах измерения повторяют, по сути, контуры геохимических работ соответствующих периодов, то есть, границы аномалий являются не природными, а лабораторными. Совершенно другую картину демонстрирует распределение уровней аномальности. В рудном поле аномалиями Pb отчетливо трассируются две системы рудоконтролирующих зон, к сопряжению которых приурочена кольцевая структура (палеокальдера), роль которой в размещении наиболее крупных месторождений рудного узла настойчиво подчеркивается геологами, изучающими этот объект [1].

Свинец в данном случае не является прямым признаком золотого оруденения, но его аномалии – важная часть многоуровневой структуры аномального (рудогенного) геохимического поля, сопровождающего формирование золоторудных месторождений. В настоящее время эмпирически установлено, что геохимические поля, сопровождающие гидротермальные рудные месторождения, являются многокомпонентными, иерархически построенными конструкциями, в которых золотое оруденение занимает вполне определенную позицию. Очень важной особенностью строения рудогенных геохимических полей является близкий состав их внешних зон, сложенных преимущественно сидерофильными элементами, вне зависимости от промышленно-генетического типа оруденения. Это однозначно указывает на заимствование указанной группы элементов из вмещающих пород и осаждении их на нисходящих ветвях конвективных гидротермальных систем. Иначе говоря, ассоциации сидерофильных элементов являются индикаторами внешних границ металлогенических таксонов различных рангов и могут использоваться для их оконтуривания.

Структурный метод существенно облегчает разбраковку многочисленных аномалий, выявляемых в процессе геохимических съемок, и позволяет выделить наиболее перспективные из них даже при идентичности продуктивности по основному элементу. Главной проблемой при использовании этого метода является правильная интерпретация внутреннего строения геохимического поля, учитывая пространственное совмещение аномальных структур различных иерархических уровней и существенный элемент субъективности при их геометризации. Объективности этой процедуры способствует комплексное применение методов математической обработки геохимической информации, которые можно объединить в 4 группы [2, 3]:

- выявление устойчивых ассоциаций элементов и анализ интенсивности их пространственного размещения (факторный, дискриминантный, регрессионный методы);
- выделение областей пространства со сходными геохимическими спектрами (кластер-анализ наблюдений, система «Геоскан» [4]);
- вычисление показателей общей интенсивности перераспределения химических элементов (энергия рудообразования, дисперсия геохимического спектра, ранговая дисперсия);
- вычисление коэффициентов зональности, опирающихся на идеи универсальной вертикальной геохимической зональности или центробежно-центростремительной дифференциации элементов в гидротермальном процессе.

Пример использования первых 2-х методов для расшифровки структуры геохимического поля приведен на рисунке 2. В разрезе через Таловское полиметаллическое месторождение (Рудный Алтай) показано размещение геохимических ассоциаций, выявленных факторным анализом, что можно интерпретировать как зональность и интенсивность отложения минеральных парагенезисов. Геоскан-модель, реализующая кластер-анализ наблюдений, иллюстрирует распределение продуктов этого процесса в плоскости разреза с выделением квазиоднородных областей со сходными геохимическими спектрами.

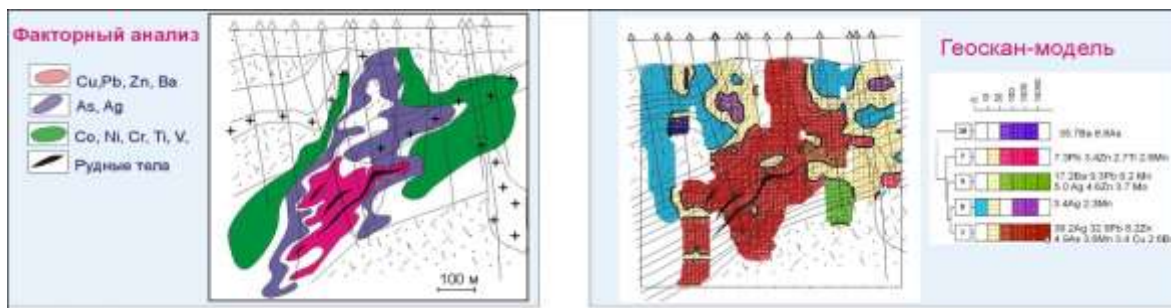


Рис. 2. Геохимическая зональность Таловского полиметаллического месторождения по данным факторного анализа и системы «Геоскан»

Состав геохимических спектров напрямую связан с количеством выделяемых классов проб, которое задается субъективно, поэтому содержательная интерпретация Геоскан-модели без данных о результатах факторного анализа представляется затруднительной, что позволяет считать оптимальным использование этих методов совместно.

Вычисление коэффициентов зональности и интенсивности для расшифровки структуры геохимического поля имеет в данном случае вспомогательное значение. Их цифровые значения могут применяться при исследовании зональности и уровня эрозионного среза новых объектов, но надо иметь в виду, что разрез – это лишь одно из множества возможных сечений геохимического поля. Классическая методика расчета коэффициентов зональности подразумевает детальное и объемное геохимическое картирование месторождения-эталона на нескольких гипсометрических уровнях, от подрудных до надрудных [5]. Такая процедура в большинстве случаев практически неосуществима, поскольку вряд ли найдется достаточное количество месторождений, где указанные горизонты одновременно и в полном объеме доступны для геохимического картирования.

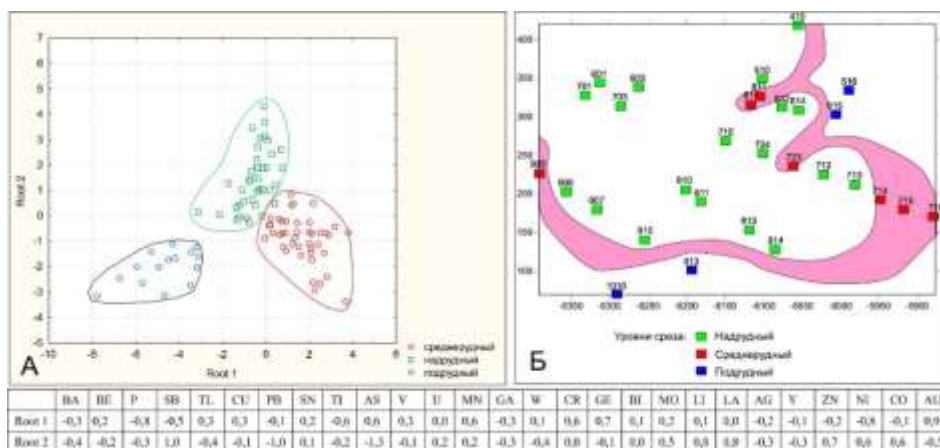


Рис. 3. Применение дискриминантного анализа для оценки уровня эрозионного среза оруденения: А – эталонные выборки в координатах многомерных канонических переменных (их состав указан в таблице); Б – геометризация выхода на поверхность рудного тела по результатам классификации проб из картировочных скважин

Для территорий, где геохимические эталоны месторождений не созданы, более оптимальным представляется другой подход. В процессе поисковых и оценочных работ появляется достаточно много пересечений первичных ореолов, относительно которых можно сделать вывод о принадлежности их к одному из 3-х уровней: подрудному, среднерудному или надрудному. Эти эталонные выборки могут быть использованы как обучающие в процедурах «распознавания образов» (дискриминантный анализ, искусственные нейронные сети и т.д.). После обучения программа может классифицировать массивы новых проб, относить их к одному из трех названных уровней, что для принятия решений в процессе поисковых и оценочных работ вполне достаточно. Эталоны могут пополняться перед началом каждого сеанса, что позволяет постоянно повышать надежность предсказания.

На рисунке 3 приведен пример использования дискриминантного анализа для оценки уровня эрозионного среза на одном из золоторудных месторождений Центрального Алдана. Полученные данные позволили оценить уровень эрозионного среза пологопадающего, сложного по морфологии рудного тела и геометризовать его выход на поверхность по результатам картировочного бурения.

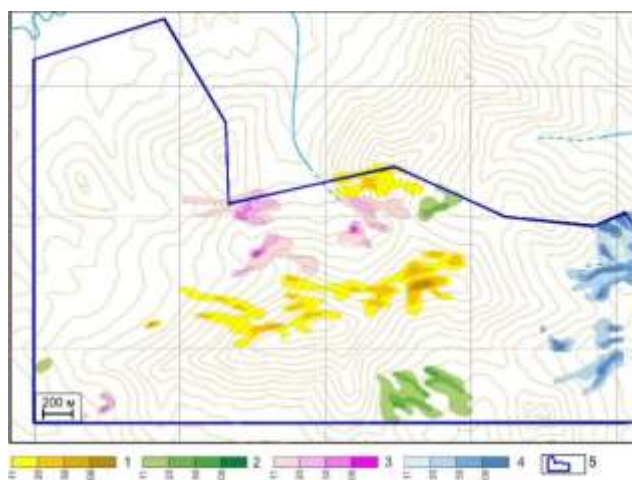


Рис. 4. Аномалии Au во вторичных ореолах золоторудного рудного поля; изолинии содержаний Au (мг/т) во вторичных ореолах, связанных: 1 – с золото-скарновым оруденением; 2 – с зонами пропилизитации; 3 – с жильным золото-редкометалльным оруденением; 4 – с золотоносными перетолженными корами выветривания; 5 – контур геохимической съемки масштаба 1:10000

Не менее важно, что в процессе проведения геохимических работ мы обязаны определить геолого-промышленный тип ожидаемого оруденения для каждой из включенных в каталог геохимических аномалий. Если таких типов ожидается несколько, классификация аномалий без применения многомерных математических процедур зачастую просто невозможна.

Рисунок 4 иллюстрирует результат классификации аномалий золота во вторичном геохимическом поле относительно их принадлежности к определенным геолого-промышленным типам. В процессе поисковых работ было выявлено большое количество аномалий золота, часть из которых фиксировала известные проявления и точки минерализации золото-скарнового, золото-редкометалльного и золото-пропилитового типов. В процессе дискриминантного анализа эти аномалии были использованы в качестве эталонов, все остальные пробы классифицированы в координатах этих эталонов. В процессе анализа выделился также четвертый класс аномалий, отличающийся от трех эталонных по геохимическим особенностям и дистанцирующийся от них пространственно. По приуроченности этих аномалий к понижениям рельефа и ложкам они были классифицированы нами как индикаторы переотложенных кор выветривания (рис. 4).

Существенную помощь в интерпретации геохимических данных оказывают и аналитические методы выявления пространственных закономерностей, прежде всего, тренд-анализ.

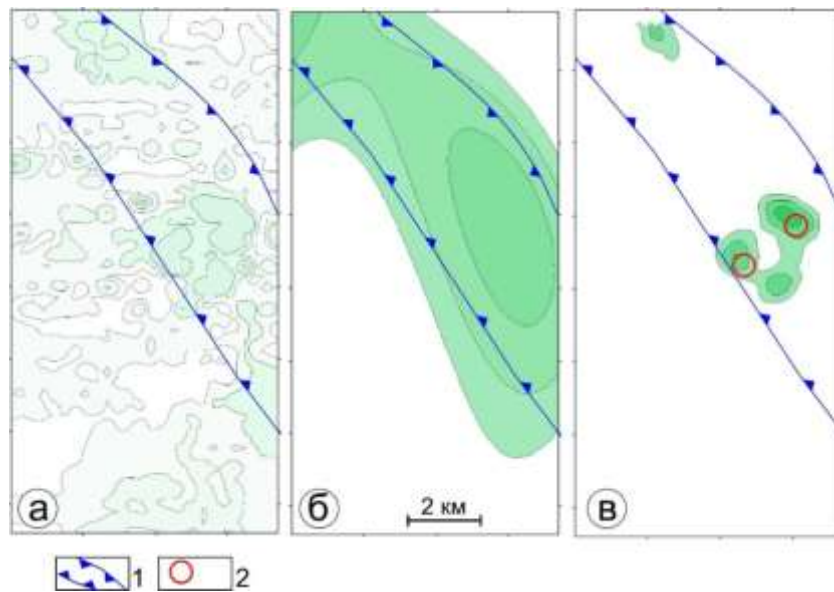


Рис. 5. Результаты тренд-анализа геохимического поля (сумма элементов-спутников золотого оруденения): а – исходное поле в изолиниях концентрации; б – тренд-поверхность 3-го порядка; в – «остатки тренда»: результат вычитания исходной поверхности из поверхности 3-го порядка; 1 – зона основных рудоконтролирующих разрывов; 2 – золоторудные месторождения

На рисунке 5 приведён результат тренд-анализа распределения во вторичных ореолах рассеяния суммы элементов-спутников золотого оруденения на одном из золоторудных полей Центрального Алдана. Поверхностью 3-го порядка отчетливо фиксируется зона основных рудоконтролирующих структур, к пересечению которой со структурами северо-восточного простирания приурочены известные месторождения. На карте «остатков тренда» (результат вычитания исходной поверхности из поверхности 3-го порядка) выделились не только известные месторождения, но и новый, пока не оцененный участок на северном фланге площади.

Все рассмотренные выше задачи успешно могут решаться и с использованием искусственных нейронных сетей, особенно, если есть возможность сочетать геохимические данные с результатами минералогического картирования, структурно-вещественного дешифрирования материалов космического зондирования и другими данными, в том числе, качественного характера.

Литература

1. Трушин С.И., Кириллов В.Е. Месторождение Албазино – новый для Дальнего Востока промышленный тип золотого оруденения // Региональная геология и металлогения. – 2018. – № 73. – С.60–67.
2. 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.
3. Ворошилов В.Г. Геохимические поля гидротермальных месторождений золота. – Томск: Изд-во STT, 2011. – 293 с.
4. Гинзбург Л.Н., Евсеев В.А., Лурье М.Б., Токавищев И.А., Карась С.А. Геоскан – программное обеспечение прогнозно-поисковых работ // Разведка и охрана недр. – 2002. – № 5. – С. 11–17.
5. Инструкция по геохимическим методам поисков рудных месторождений / Отв. ред. Л.Н. Овчинников. – М.: Недра, 1983. – 198 с.