

УДК 550.4.08:553.411

## К ВОПРОСУ О ГЕОМЕТРИЗАЦИИ АНОМАЛЬНЫХ СТРУКТУР ГЕОХИМИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

В.Г. Ворошилов

Томский политехнический университет

E-mail: voroshilovvg@ign.tpu.ru

*Обсуждаются возможности различных математических методов при геометризации аномальных геохимических полей рудных месторождений. На конкретном примере рассмотрены особенности применения для решения этих задач линейных и нелинейных методов распознавания образов: дискриминантного анализа, метода множественной регрессии, искусственных нейронных сетей. Определены условия оптимального использования названных методов. Показана возможность использования данных картирования вторичных ореолов для идентификации структуры первичного аномального геохимического поля.*

Исследование зональности аномальных геохимических полей является составной частью проблемы эндогенной зональности, одной из важнейших в теории рудных месторождений. То постоянное внимание, которое проявляют к этой проблеме исследователи, обусловлено как ее значением для развития теории рудообразования, так и возможностью практического использования выявленных закономерностей для прогнозирования скрытого оруденения.

Универсальность вертикальной геохимической зональности первичных ореолов рудных месторождений, впервые отмеченная Н.И. Сафроновым [1] и наиболее полно обоснованная для сульфидсодержащих месторождений [2, 3], положена в основу ряда методик, уже более 30 лет использующихся для количественного прогноза оруденения, определения уровня его эрозионного среза, оценки флангов и глубоких горизонтов месторождений. Между тем установлено, что на золоторудных месторождениях, где обычным является столбовое и ярусное распределение оруденения, убывание с глубиной значений коэффициентов зональности часто сочетается с очень сложным их распределением в плоскости рудных тел, что делает проблематичным использование названных коэффициентов при достаточно редкой сети опробования. Кроме того, многие авторы в понятие аномалии, кроме ореолов привноса элементов, включают и области их выноса, считая эти сопряженные в пространстве положительные и отрицательные аномалии составными частями единых иерархически построенных структур [4–8].

Структурный метод исследования геохимических полей в наиболее последовательном виде изложен С.А. Григоровым [9]. Этим автором в строении аномальной структуры геохимического поля (АСГП) рудного объекта любого ранга выделяются: ядерная зона концентрирования рудных элементов, окружающая ее зона транзита (с пониженными концентрациями рудных элементов) и внешняя (фронтальная) зона концентрирования. Перечисленные зоны, в свою очередь, формируют зону ядерного концентрирования следующего иерархического уровня. Тесная функциональная связь между всеми элементами АСГП определяет обяза-

тельность наличия всех иерархических уровней старшего ранга при наличии младшего. Оруденение занимает в АСГП вполне определенное положение, поэтому структурный метод существенно облегчает разбраковку многочисленных аномалий, выявляемых в процессе геохимических съемок, и позволяет выделить наиболее перспективные из них даже при идентичности их продуктивности по основному элементу.

Главной проблемой при использовании структурного метода является корректная интерпретация внутреннего строения геохимического поля, учитывая пространственное совмещение аномальных структур различных иерархических уровней и существенный элемент субъективности при их геометризации.

Для исследования структуры аномальных геохимических полей в настоящее время используются разнообразные группы методов, основанные на различных теоретических предпосылках. Большинство авторов отдает предпочтение какой-либо одной методике, поэтому представляется целесообразным провести сравнительный анализ достоинств и недостатков наиболее распространенных способов геометризации аномальных геохимических полей. К их числу относятся: 1) *R*-метод факторного анализа, как представитель методов кластеризации переменных; 2) система «Геоскан», реализующая модернизированную идеологию кластер-анализа наблюдений; 3) методы, основанные на идеях дифференциальной подвижности элементов в гидротермальном процессе (коэффициенты зональности); 4) методы вычисления интенсивности геохимических преобразований (энергия рудообразования, ранговая дисперсия, дисперсия геохимического спектра и др.). В ряде случаев для идентификации строения аномального геохимического поля необходимо применение методов распознавания образов, в качестве которых могут быть использованы линейные методы регрессионного и дискриминантного анализов и искусственные нейронные сети.

Проведенный нами сравнительный анализ эффективности перечисленных методик позволяет констатировать, что участки максимального оруденения с разной степенью детальности фиксируются

большинством из рассмотренных методов, однако корректная расшифровка структуры аномального геохимического поля и, в конечном счете, прогноз оруденения возможны только при комплексировании нескольких способов геометризации, использующих разную идеологию [11, 12]. Методы группирования переменных позволяют реставрировать ход гидротермального процесса на уровне минеральных парагенезисов и геометризовать интенсивность их проявления. Кластеризация наблюдений фиксирует суммарный итог всех минералообразующих процессов и позволяет дифференцировать аномальное геохимическое поле в градациях интенсивности, оценивая специфику выделенных зон через их геохимические спектры. Дополнительную информацию для оконтуривания АСПП и оценки эрозионного среза оруденения дают показатели зональности, фиксирующие тенденции дифференцированного распределения элементов в гидротермальном процессе. Показатели интенсивности позволяют судить о масштабах оруденения и дают дополнительную информацию для расшифровки генезиса геохимической зональности.

Прямое использование более опосредованных методов распознавания образов для геометризации АСПП обычно не практикуется. Однако существует ряд задач, где их применение необходимо. В частности, к таким задачам относятся: оценка уровня эрозионного среза пологозалегающих рудных тел, идентификация фаций метасоматитов по данным геохимических работ, предсказание минеральных типов руд по геохимическим данным и другие. Кроме того, с помощью методов распознавания образов можно идентифицировать зоны АСПП в тех случаях, когда количество проб недостаточно для оконтуривания структуры в целом. Подобная ситуация обычна при проходке поисковых скважин или выработок. В качестве обучающей выборки при этом следует использовать результаты картирования хорошо изученного месторождения-эталона.

Зональность аномальных геохимических полей гидротермальных месторождений золота проявляется, прежде всего, в полярном поведении двух групп элементов, которые мы, вслед за Е.В. Плющевым [12], именуем концентрирующимися и деконцентрирующимися. Концентрирующиеся элементы (в основном, халькофильные) накапливаются вместе с золотом в рудных телах, деконцентрирующиеся элементы (преимущественно сидерофильные и литофильные) характерны для околорудного пространства, в рудных телах их содержания обычно ниже фоновых. Элементный состав названных групп, зависящий от условий формирования оруденения, определяется методами кластеризации переменных для конкретных геолого-промышленных типов месторождений. Интенсивность привноса и выноса выявленных таким способом ассоциаций элементов геометризуется как сумма их коэффициентов концентрации относительно кларка. Минимально-аномальные значения этих показателей вычисляются по стандартной методике, по-

этому контуры получаемых аномалий не зависят от субъективных пристрастий исполнителя.

Следующим этапом является оценка степени упорядоченности выявленных аномальных структур. Поскольку упорядоченность выражается через контрастность различий в составе центральных и промежуточных зон АСПП, для ее количественной характеристики предлагается использовать стандартные критерии для проверки гипотезы о равенстве двух неизвестных средних. Сравниваются между собой средние коэффициенты концентраций деконцентрирующихся элементов в центральной и промежуточной зонах АСПП, поскольку поведение этих элементов в названных зонах диаметрально противоположно. При нормальном законе используется критерий Стьюдента, при логнормальном – критерий Д.А. Родионова, при неизвестном законе распределения – ранговые критерии [13].

Названные критерии имеют различные интервалы значений, но все они могут быть выражены в градациях доверительной вероятности, поэтому для удобства использования числовое значение коэффициента упорядоченности ( $K_{уп}$ ) принимается равным квантили нормального распределения, соответствующей вычисленному уровню значимости критерия. В качестве граничного принимается значение  $K_{уп}=2,0$  (что соответствует уровню значимости 0,05). Теоретически диапазон значений  $K_{уп}$  не ограничен, фактически для среднерудных срезов месторождений он не выходит за пределы 10...16, а по мере выклинивания оруденения постепенно снижается до незначимого уровня.

На рис. 1, А, приведено строение АСПП в разрезе через Главное рудное тело месторождения Олимпиада (Енисейский край). Аномальная структура имеет отчетливое концентрическое строение с обособлением центральной (ядерной), промежуточной и фронтальной зон. В центральной зоне накапливаются Au, As, Sb, W, Ag, Cu, в промежуточной – Ba, Mn, во фронтальной – Ti, Cr, V. Коэффициент упорядоченности для приведенного сечения АСПП составляет 16, что указывает на высокую степень концентрирования рудных элементов.

Результаты геохимического опробования по приведенному разрезу использованы в качестве обучающей выборки для методов распознавания образов. Применены три их модификации: 1) искусственные нейронные сети, 2) метод множественной регрессии и 3) дискриминантный анализ.

Искусственные нейронные сети, являющиеся примитивными моделями биологических систем, с успехом могут быть использованы для нелинейного многомерного моделирования геохимических полей. Это направление статистических исследований переживает в последние годы бурное развитие, особенно в тех областях науки и производства, где требуется решение задач прогнозирования, классификации или управления. Суть нейронных систем заключается в следующем. В системах с прямой передачей сигналов, которые обычно используются

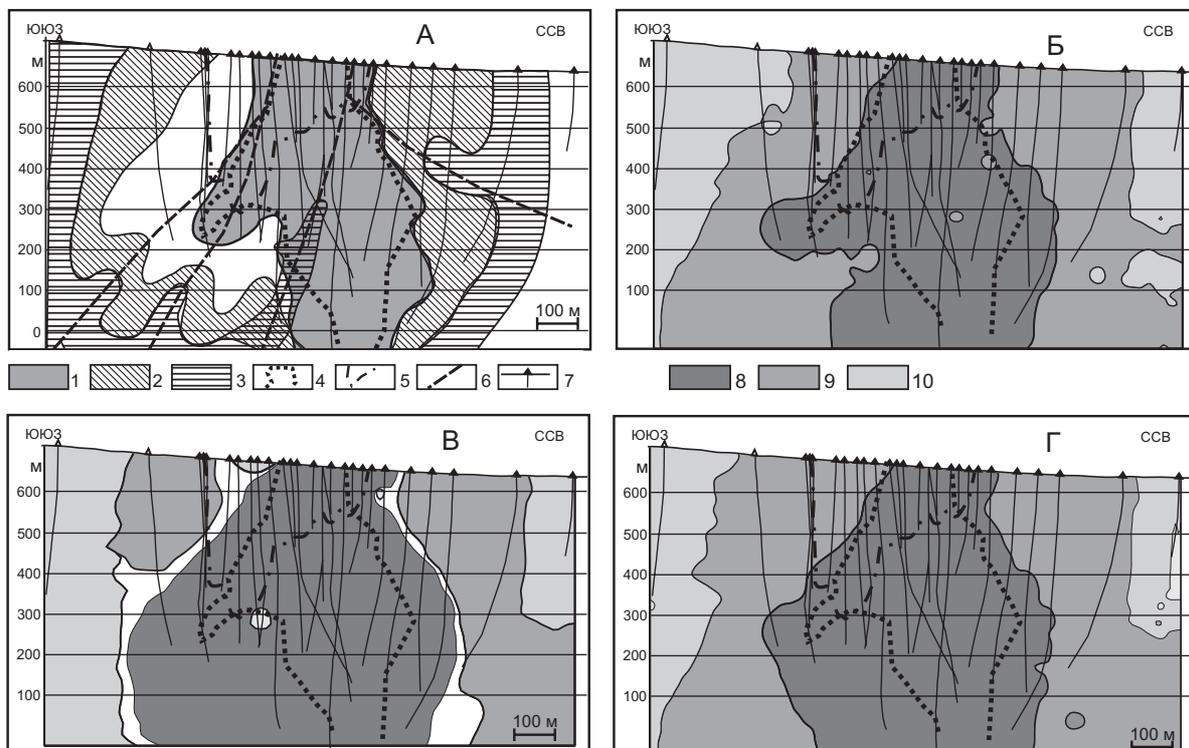
при решении практических задач, все нейроны организованы в слои. Входной слой служит просто для ввода значений входных переменных. Нейроны промежуточных слоев предназначены для переработки поступающей информации путем вычисления значений активации, которые на выходе преобразуются в функции активации. В обычно используемых сетях с полной системой связи каждый из нейронов связан со всеми элементами предыдущего слоя. После того, как вся сеть отработает, значения элементов выходного слоя принимаются за выход сети в целом. Таким образом, зависимость между входной и выходной информацией сети устанавливается в процессе обучения. Обучение может быть управляемое («с учителем») и неуправляемое («без учителя»).

При управляемом обучении необходимо подготовить набор обучающих данных, которые представляют собой примеры входных данных и соответствующих им выходов. Сеть в этом случае учится устанавливать связь между первыми и вторыми, а затем самостоятельно классифицирует новые входные данные, для которых выходные значения неизвестны. В качестве алгоритма управляемого обучения чаще всего используют метод обратного распространения, при котором имеющиеся данные используются для корректировки весов и пороговых значений сети таким образом, чтобы миними-

зировать ошибку прогноза на обучающем множестве. Во многих программных реализациях (в частности, в широко используемом пакете ST Neural Networks фирмы StatSoft, использованном в нашей работе) включен специальный алгоритм автоматического поиска оптимальной конфигурации сети. Следует заметить, что системы, содержащие только входной и выходной слои генерируют линейные модели и фактически линейной дискриминантной функции (при решении задач классификации), или процедуре множественной регрессии (при решении регрессионных задач).

Результат использования метода нейронных сетей (рис. 1, Б) подтверждает наличие контрастной concentрической зональности исследованной АСГП и свидетельствует о перспективности использования данного метода для расшифровки структуры аномальных геохимических полей.

Результаты линейных методов регрессионного и дискриминантного анализов также указывают на контрастную зональность описываемой структуры (рис. 1, В, Г). Статистики, полученные по обучающей выборке с пробами из заведомо центральной, промежуточной и фронтальной зон (коэффициент множественной корреляции 0,75; лямбда Уилкса менее 0,18;  $F(46, 1344)=18,3$ ), свидетельствуют о надежном разделении указанных зон с вероятностью свыше 0,9999 (рис. 2). Об этом же свидетель-



**Рис. 1.** Структура аномального геохимического поля в вертикальном разрезе через Главное рудное тело Олимпиадинского месторождения по разведочной линии 25: А) геохимические ассоциации по данным факторного анализа: 1) Au, As, Sb, Mn, Ag, Cu, W; 2) Ba, Mn; 3) Ti, Cr, V; 4) контур рудного тела; 5) линейная кора выветривания; 6) разрывы; 7) разведочные скважины; Б-Г) структура геохимического поля, реставрированная методами распознавания образов: Б) искусственные нейронные сети; В) множественная регрессия; Г) дискриминантный анализ; 8-10) зоны АСГП, установленные методами распознавания образов: 8) внутренняя; 9) промежуточная; 10) внешняя

ствуют высокие значения расстояний Махаланобиса между центрами выделенных кластеров (14,2 между центральной и промежуточной зонами; 5,8 между промежуточной и фронтальной и 15,3 между центральной и фронтальной зонами при статистически значимом расстоянии 3,0).

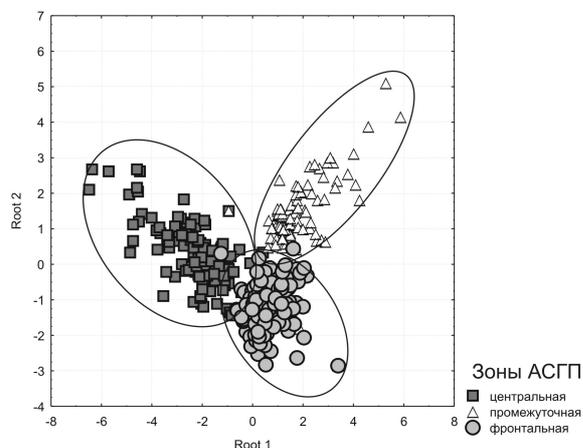


Рис. 2. Дифференциация зон АСГП Олимпиадинского месторождения по результатам дискриминантного анализа

Результаты обучения распространены на весь массив проб и использованы для идентификации структуры аномального геохимического поля в разрезе через рудное тело Западного участка месторождения Олимпиада. Несмотря на то, что Главное рудное тело по многим параметрам является уникальным, полученная картина свидетельствует о достаточно хорошем качестве распознавания и принципиальной возможности использования методов распознавания образов для геометризации АСГП (рис. 3). В наибольшей степени отвечает реальной ситуации структура геохимического поля, реставрированная методом дискриминантного анализа (рис. 3, А). Близкую картину дает метод нейронных сетей (рис. 3, Б). Менее определенны результаты регрессионного анализа (рис. 3, В).

Таким образом, линейный метод дискриминантного анализа при расшифровке структуры геохимического поля ничем не уступает более сложным в использовании нелинейным методам искусственных нейронных сетей, на что указывалось нами и ранее [10]. Этот вывод справедлив для случаев, когда исходные данные представлены од-

Таблица. Структура многомерных канонических переменных, выявленных дискриминантным анализом (Олимпиадинское месторождение)

Root	Fe	Ti	Ba	Cr	V	Ni	Co	Cu	Pb	Zn	Sb	As	Ag	Mo
1	-0,32	0,03	0,43	0,24	0,48	0,10	-0,10	0,05	0,39	0,11	-0,53	-0,65	-0,13	0,00
2	0,17	-0,29	0,36	-0,38	0,37	0,27	0,02	-0,03	-0,07	-0,19	0,35	0,25	-0,22	0,07

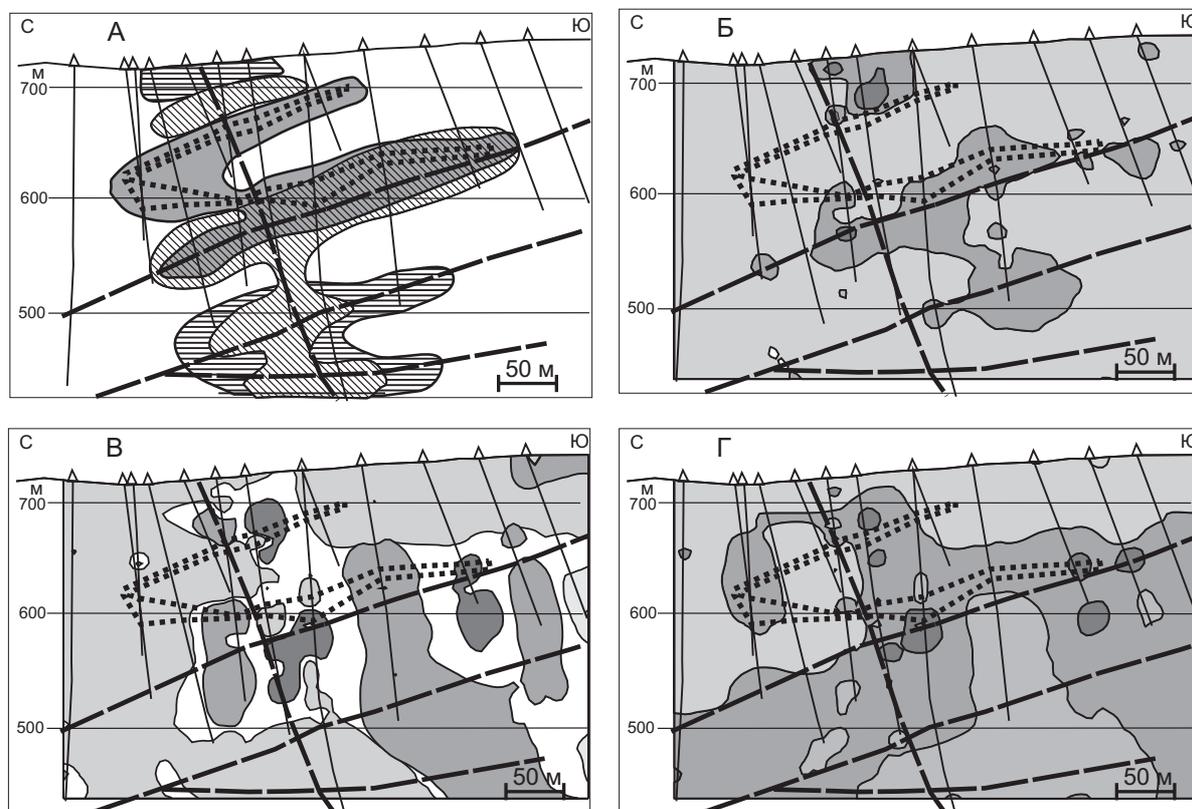
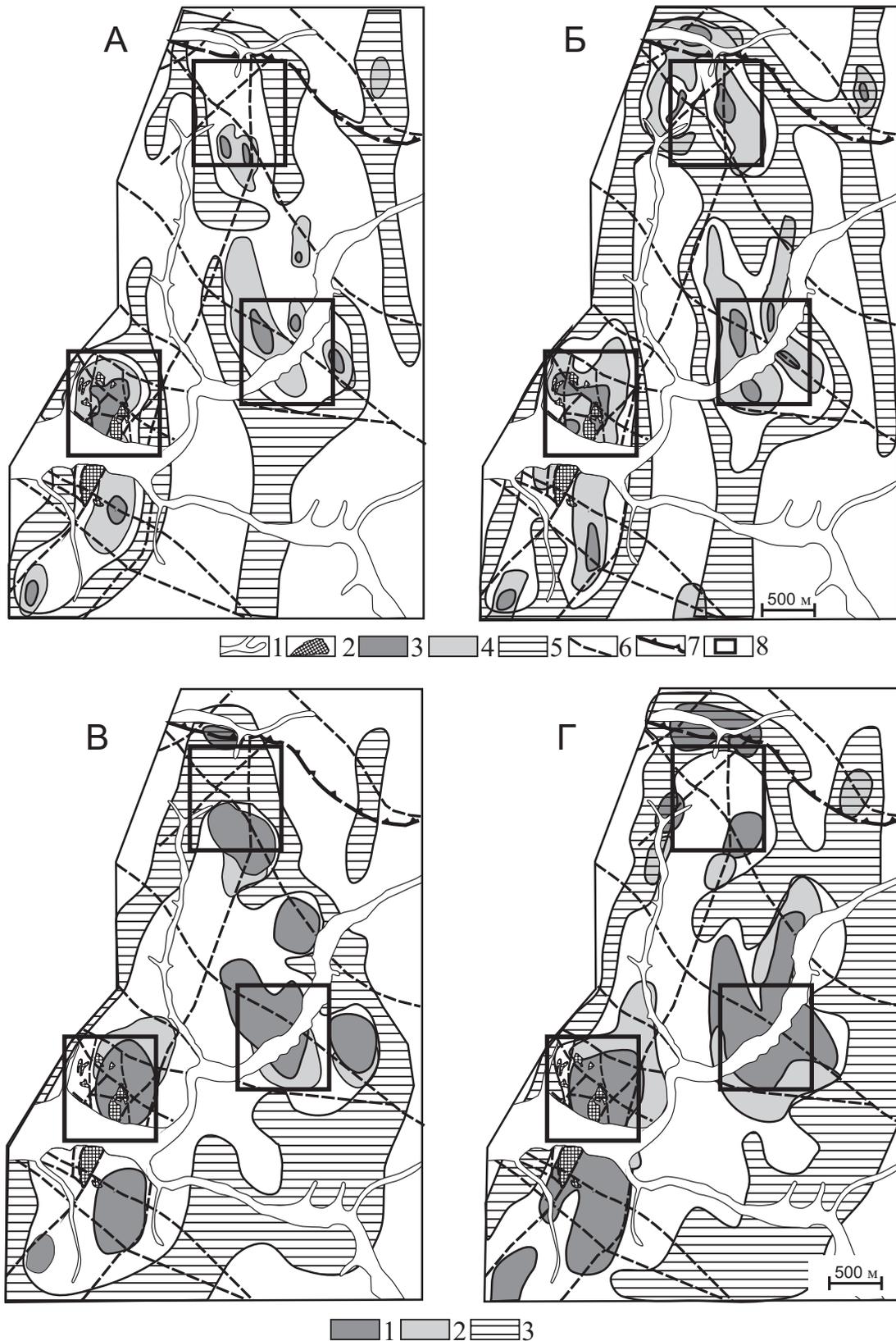


Рис. 3. Структура аномального геохимического поля в вертикальном разрезе через рудное тело Западного участка Олимпиадинского месторождения по разведочной линии 8: условные обозначения на рис. 1



**Рис. 4.** Структура первичного и вторичного аномальных геохимических полей Майско-Лебедского рудного поля (составил автор по материалам ООО «Тэтис-Т»): А) распределение геохимических ассоциаций во вторичном геохимическом поле; Б) то же в первичном геохимическом поле: 1) аллювиальные отложения; 2) скарны; ассоциации: 3) Au, Ag, Cu, Bi, As, Pb, Zn; 4) Cr, Ni, V; 5) Ti, Zr, Ba; 6) разрывные нарушения; 7) Талонский надвиг; 8) золоторудные участки ранга месторождений; В) положительные аномалии коэффициентов относительной концентрации во вторичном геохимическом поле: 1) Co:Ni; 2) Ag:Au; 3) Pb:Zn; Г) то же в первичном геохимическом поле

народными количественными данными, а число переменных не слишком велико. Применение метода нейронных сетей, следовательно, целесообразно в ситуациях, когда наблюдения представлены как количественными, так и качественными данными и (или) число переменных слишком велико, что затрудняет использование линейных методов.

Объективная геометризация АСГП по первичным ореолам в большинстве случаев возможна только для рудных тел и детально изученных месторождений. Плотность сети опробования коренных пород при поисково-оценочных работах, как правило, недостаточна для корректной количественной оценки параметров АСГП рангов месторождений и рудных полей, поэтому привлечение для этих целей результатов картирования вторичных геохимических полей представляется необходимым элементом исследований. Соотношение концентраций элементов в первичных и вторичных ореолах контролируется целым набором факторов, предсказать суммарное влияние которых практически невозможно. Коэффициенты остаточной продуктивности обычно рассчитываются на каждом объекте в ходе специальных исследований. Полученные нами данные указывают на то, что АСГП, выявленные в первичных полях, в целом сохраняют свою морфологию во вторичных аккумуляциях (рис. 4).

Количественные параметры АСГП при этом в определенной степени искажаются, но могут быть скорректированы в соответствии с вычисленными для каждого показателя коэффициентами остаточной продуктивности [14].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сафронов Н.И. К теории первичных ореолов рассеяния // Информационный сборник ВИТР. – 1959. – № 21. – С. 106–132.
2. Беус А.А., Григорян С.В. Геохимические методы поисков и разведки месторождений полезных ископаемых. – М.: Недра, 1975. – 280 с.
3. Григорян С.В. Первичные геохимические ореолы при поисках и разведке рудных месторождений. – М.: Недра, 1987. – 408 с.
4. Гольдберг И.С., Абрамсон Г.Я., Лось В.Л. Поиски рудных объектов на основе полярной зональности геохимических систем // Прикладная геохимия. Вып. 3. – М.: ИМГРЭ, 2002. – С. 305–324.
5. Рослякова Н.В., Росляков Н.А. Эндеогенные ореолы месторождений золота. – Новосибирск: Наука, 1975. – 132 с.
6. Richardson C.Y., Cann J.R., Richards H.G., Cowan J.G. Metaldepleted root zones of the Troodos ore-forming hydrothermal system, Cyprus // Earth and Planetary Science Letters. – 1987. – V. 846. – P. 243–253.
7. Robertson L.D.M., Taylor G.F. Depletion haloes in rocks surrounding the Cobar Orebodies, NSW, Australia: implication for exploration and ore genesis // J. Geochem. Explor. – 1987. – V. 27. – P. 77–101.
8. Rowland J.V., Sibson R.H. Structural controls on hydrothermal flow in a segmented rift system, Taupo Volcanic Zone, New Zealand // Geofluids. – 2004. – V. 4. – № 4. – P. 259–283.

#### Заключение

1. Проанализированы возможности различных математических методов при геометризации аномальных геохимических полей рудных месторождений. Установлено, что методы группирования переменных позволяют геометризовать интенсивность проявления минеральных парагенезисов, а кластеризация наблюдений фиксирует суммарный итог всех минералообразующих процессов и позволяет дифференцировать аномальное геохимическое поле в грациях интенсивности, оценивая специфику выделенных зон через их геохимические спектры.
2. Установлено, что линейный метод дискриминантного анализа при расшифровке структуры геохимического поля, в условиях однородности исходных количественных данных, ничем не уступает более сложным в использовании нелинейным методам искусственных нейронных сетей. Поэтому нейронные сети рекомендуется применять в ситуациях, когда наблюдения представлены как количественными, так и качественными данными и (или) количество переменных настолько велико, что затрудняет использование линейных методов.
3. Выявленные в первичных ореолах аномальные структуры геохимических полей в целом сохраняют свою морфологию и продуктивность во вторичных аккумуляциях. Это позволяет считать легитимным использование данных картирования вторичных ореолов для идентификации структуры первичного аномального геохимического поля (с учетом соответствующих поправочных коэффициентов).
9. Григоров С.А. и др. О структурах геохимических полей на месторождениях Северо-Востока СССР // Доклады АН СССР. – 1988. – Т. 300. – № 1. – С. 201–204.
10. Ворошилов В.Г. Методика выявления структуры аномальных геохимических полей рудных месторождений // Известия Томского политехнического университета. – 2004. – Т. 307. – № 2. – С. 55–61.
11. Ворошилов В.Г. Методика комплексного анализа структуры аномальных геохимических полей (на примере Рудного Алтая) // Поисковая геохимия: теоретические основы, технологии, результаты / Под ред. Б.С. Ужженова. – Алматы, 2004. – С. 115–124.
12. Плюшев Е.В., Шатов В.В. Геохимия и рудоносность гидротермально-метасоматических образований. – Л.: Недра, 1985. – 247 с.
13. Справочник по математическим методам в геологии / Д.А. Родионов, Р.И. Коган, В.А. Голубева и др. – М.: Недра, 1987. – 335 с.
14. Ворошилов В.Г., Тимкин Т.В. Количественная оценка параметров аномального геохимического поля и прогноз золотого оруденения // Известия Томского политехнического университета. – 2007. – Т. 310. – № 2. – С. 17–21.

Поступила 9.04.2007 г.