

8. Петровская Н.В. Самородное золото (общая характеристика, типоморфизм, вопросы генезиса). – М.: Наука, 1973. – 330 с.
9. Буряк В.А., Бакулин В.И. Металлогения золота. – Владивосток: Дальнаука, 1998. – 402 с.
10. Нарсеев В.А. Состояние и основные проблемы современной геохимии золота // Геология и охрана недр (Республика Казахстан). – 2002. – № 1. – С. 32–43.
11. Кучеренко И.В. О фосфор-магний-титановой специализации золотоносных березитов // Доклады АН СССР. – 1987. – Т. 293. – № 2. – С. 443–447.
12. Ворошилов В.Г., Санин В.Н., Тимкин Т.В. Аномальные геохимические поля зон сульфидной минерализации Майско-Лебедского золоторудного узла // Известия Томского политехнического университета. – 2006. – Т. 309. – № 3. – С. 26–31.
13. Мальковский В.И., Пэк А.А. Влияние фокусирующих свойств высокопроницаемых разломов на развитие рудообразующих систем // Флюидные потоки в земной коре и мантии / Отв. ред. В.А. Жариков. – М.: ИГЕМ РАН, 2002. – С. 104–108.
14. 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.
15. Ворошилов В.Г. О взаимосвязи структуры аномального геохимического поля с механизмом формирования гидротермальной системы // Известия Томского политехнического университета. – 2006. – Т. 309. – № 4. – С. 35–40.
16. Гольдберг И.С., Воронин Д.В. Отрицательные геохимические аномалии и их роль при поисках и прогнозной оценке гидротермальных рудных месторождений // Методы интерпретации результатов литохимических поисков. – М.: Наука, 1987. – С. 52–57.
17. 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. – № 2 – P. 243–253.
18. 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. – № 1. – P. 77–101.
19. Баранов Э.Н., Архангельский А.Н. Научные основы геохимического метода прогноза скрытых колчеданных месторождений по ореолам выноса // Теория и практика геохимических поисков в современных условиях / Под ред. Л.Н. Овчинникова. – М.: Наука, 1990. – С. 108–124.
20. Питулько В.М., Крицук И.Н. Основы интерпретации данных поисковой геохимии. – Л.: Недра, 1990. – 336 с.
21. 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.
22. Овчинников Л.Н. Прикладная геохимия. – М.: Недра, 1990. – 248 с.
23. Силаев В.И. Парадигма глобальной геохимической дифференциации и перспективы минералого-геохимических исследований рудоносности // Геохимия рудообразующих систем и металлогенический анализ / Отв. ред. Ю.Г. Щербаков. – Новосибирск: Наука, 1989. – С. 180–190.

Поступила 04.09.2006 г.

УДК 553.311

## КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ АНОМАЛЬНОГО ГЕОХИМИЧЕСКОГО ПОЛЯ И ПРОГНОЗ ЗОЛОТОГО ОРУДЕНЕНИЯ

В.Г. Ворошилов, Т.В. Тимкин

Томский политехнический университет

E-mail: voroshilovvg@ign.tpu.ru

*Исследовано строение аномальных геохимических полей, сопровождающих золотое оруденение, разработаны критерии его количественной оценки. Предложены методы оценки упорядоченности аномальных структур геохимических полей и интенсивности гидротермального процесса. Установлена зависимость между количественными параметрами этих структур и масштабами золотого оруденения. Показана возможность оценки эрозийного среза месторождений и рудных полей по значениям параметров аномальных геохимических полей.*

Количественная оценка коренного оруденения на основе геохимических данных традиционно опирается на прямой подсчет ресурсов металла на основе концентраций его в ореолах и потоках рассеяния [1–3]. К сожалению, в отношении золота этот метод не всегда дает нужный результат. Исключительная неравномерность распределения золота в первичных ореолах, сложность его поведения при формировании вторичных ореолов и потоков рассеяния приводят к неоднозначности оценки масштабов оруденения по содержаниям в ореолах золота. Дополнительную неопределенность вносят также проблемы аналитического характера. В то же время, гидротермальные месторождения золота

всегда сопровождаются широким кругом элементов-спутников, формирующих комплексные по составу аномальные структуры геохимических полей (АСГП) различного ранга. Эти структуры достаточно хорошо сохраняются во вторичных геохимических аккумуляциях [4]. Во всяком случае, во вторичном геохимическом поле уверенно идентифицируются АСГП месторождений и крупных рудных тел, а в потоках рассеяния – структуры ранга рудных полей и крупных месторождений. Количественно-морфологическая оценка этих АСГП дает достаточно объективную информацию о масштабах гидротермального процесса и может служить дополнительным критерием для корректировки

ресурсов коренного золота и ранжирования перспективных площадей.

Комплексный характер геохимических полей широко используется при прогнозной оценке территорий [5], но речь обычно идет об общей продуктивности металлоносных объектов, безотносительно к морфологическим особенностям сопровождающих их АСГП. Количественное моделирование объемных фигур АГП практикуется также для оценки уровней эрозионного среза оруденения [6]. Количественно-морфологический анализ АСГП в целях прогнозирования проведен для золоторудных месторождений Дальнего Востока С.В. Соколовым [7]. В основу прогноза положены соотношения продуктивностей центробежных и центростремительных (в понимании С.В. Соколова) элементов, что позволило максимально локализовать перспективные площади и уточнить их ресурсы.

В целом можно констатировать, что вопросы количественной оценки АСГП в полной мере пока не решены, что обусловлено, прежде всего, неопределенностью критериев их геометризации. Многообразие подходов к решению этого вопроса определяет несопоставимость получаемых различными авторами результатов и диктует необходимость выработки общей методики, опирающейся на стандартизованные показатели. Как неоднократно подчеркивалось многими авторами, зональность аномальных геохимических полей гидротермальных месторождений проявляется, прежде всего, в полярном поведении концентрирующихся и деконцентрирующихся (по отношению к золоторудным телам) элементов [8–10]. Их набор, зависящий от условий формирования оруденения, не может задаваться априори и определяется методами кластеризации переменных для конкретных геолого-промышленных типов месторождений. Интенсивность привноса и выноса выявленных таким способом ассоциаций элементов предлагается геометризовать как сумму их кларков концентрации. Минимально-аномальные значения этих показателей вычисляются по стандартной методике [2], поэтому контуры получаемых аномалий не зависят от субъективных пристрастий исполнителя. Дополнительными критериями корректной геометризации АСГП различных рангов служит распределение значений коэффициентов относительной концентрации (ОК) элементов: аномалии отношений Pb:Zn тяготеют к надрудным уровням, а Co:Ni – к нижнерудно-подрудным.

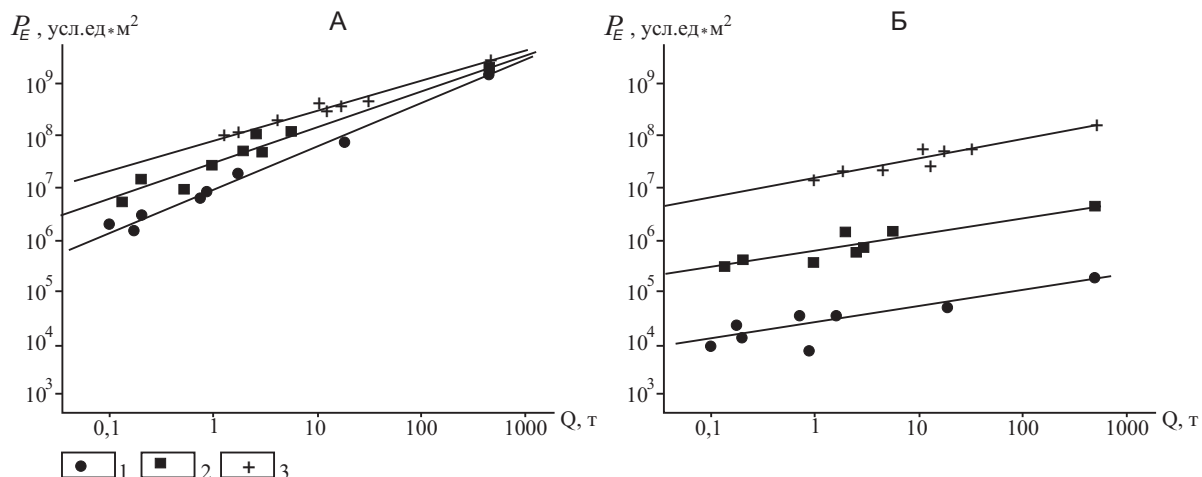
Следующим этапом является оценка степени упорядоченности выявленных аномальных структур. Главным признаком упорядоченности АСГП мы считаем наличие фокуса зональности – области пространства, откуда исходят векторы зональности при ее центробежном характере или куда они сходятся в случае центростремительной зональности. Поскольку упорядоченность выражается через контрастность различий в составе фокальных и промежуточных зон АСГП, для ее количественной характеристики предлагается использовать

стандартные критерии для проверки гипотезы о равенстве двух неизвестных средних. Сравниваются между собой средние кларки концентраций деконцентрирующихся элементов в фокальной и промежуточной зонах АСГП. При нормальном законе используется критерий Стьюдента, при логнормальном – критерий Д.А. Родионова, при неизвестном законе распределения – ранговые критерии. Для удобства использования числовое значение коэффициента упорядоченности ( $K_{уп}$ ) принимается равным квантили нормального распределения, соответствующей вычисленному уровню значимости критерия. В качестве граничного принимается значение  $K_{уп}=2$  (для доверительной вероятности 0,95). Значения показателя зависят от объема выборки, поэтому при одной и той же плотности опробования они пропорциональны масштабам аномальных структур. Теоретически диапазон значений  $K_{уп}$  не ограничен, фактически для среднерудных срезов он не выходит за пределы 16...18, а по мере выклинивания оруденения постепенно снижается до незначимого уровня.

Масштабы выявляемого оруденения функционально связаны с общей интенсивностью гидротермального процесса, количественным выражением которой служит показатель энергии рудообразования [11]:  $E=\sum \ln(KK_i) \cdot KK_i$ , где  $KK_i$  – кларк концентрации  $i$ -го элемента

Значения показателя отражают суммарный баланс вещества в каждой точке опробования, поэтому целесообразно вычислять их отдельно для концентрирующихся и деконцентрирующихся элементов. Для каждого из этих показателей вычисляются фоновые и минимально-аномальные значения и продуктивность в границах АСГП. При оценке масштабов оруденения продуктивности  $E_{конц.}$  и  $E_{деконц.}$  используются как самостоятельные показатели, отражающие разные стороны одного процесса. Эмпирически нами установлено, что продуктивности  $E_{конц.}$  и  $E_{деконц.}$  различаясь между собой на 1–2 порядка, прямо пропорциональны ресурсам золота в АСГП соответствующих рангов. В логарифмическом масштабе эти зависимости хорошо аппроксимируются прямыми линиями и могут быть использованы для оценки масштабов выявляемого оруденения (рис. 1). Для концентрирующихся элементов осредняющие прямые имеют сходящийся характер, что отражает высокую степень концентрированности оруденения в крупных и гигантских месторождениях. Продуктивность деконцентрирующихся элементов в гораздо большей степени определяется рангом (площадью) структур, что указывает на взаимодействие их из вмещающих пород. Об этом же свидетельствует зависимость масштабов перераспределения деконцентрирующихся элементов от состава субстрата, особенно отчетливо проявляющаяся в АСГП ранга рудных тел.

Геохимические ресурсы золота в аномальных полях, являясь отражением масштабов промышленного оруденения, тем не менее, связаны с ни-

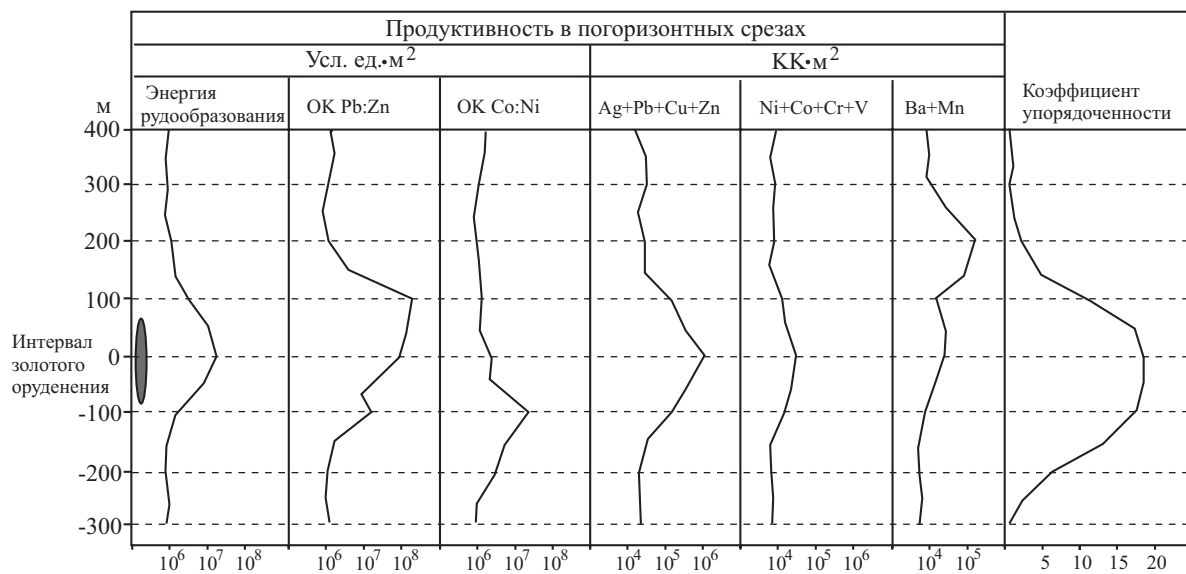


**Рис. 1.** Зависимость между масштабами золотого оруденения  $Q$  и продуктивностью показателя энергии рудообразования  $P_E$  для элементов: А) концентрирующихся, Б) деконцентрирующихся. Ранги АСГП: 1 – рудного тела; 2 – месторождения; 3 – рудного поля

ми сложной зависимостью. Кондиционность руд зависит от степени концентрированности, которая, в свою очередь, обратно пропорциональна рангу АСГП, что вытекает из постулата о преобладании для всех элементов рассеянного состояния над концентрированным [1]. Для АСГП ранга рудных тел установлена прямая пропорциональная зависимость коэффициента балансовых руд ( $\alpha$ ) от масштабов оруденения, при этом значения показателя изменяются от 0,2 до 0,9 [1, 12]. Применительно к золоторудным месторождениям Дальнего Востока С.В. Соколовым [7] оценены средние значения  $\alpha$  для АСГП рангов рудных тел (0,52), месторождений (0,21) и рудных полей (0,14). Для более крупных подразделений значения  $\alpha$  последовательно снижаются и в структурах глобального уровня составляют  $n \cdot (10^{-4} \dots 10^{-7})$  [1], где  $n=1,2,\dots,10$ . Приведенные данные учтены нами при оценке ресурсов золота в тех

случаях, когда не было возможности прямого определения коэффициента балансовых руд по данным опробования горных выработок и керна скважин.

Оценка уровня эрозийного среза оруденения – одна из главных задач геохимических исследований. Для АСГП ранга рудных тел и месторождений методика такой оценки, опирающейся на ряд вертикальной геохимической зональности элементов, хорошо апробирована и подробно освещена в литературе [1, 12 и др.]. Применение этой методики на золоторудных месторождениях часто осложняется центростремительным характером объемной зональности рудных столбов и, как следствие, ярусным характером изменения с глубиной коэффициентов зональности. Более выдержано изменение по вертикали относительных концентраций (ОК) родственных элементов. Рис. 2 демонстрирует типичную картину изменения с глубиной количествен-



**Рис. 2.** Изменение с глубиной параметров АСГП месторождения Центральные Штоки Казского рудного поля (Горная Шория)

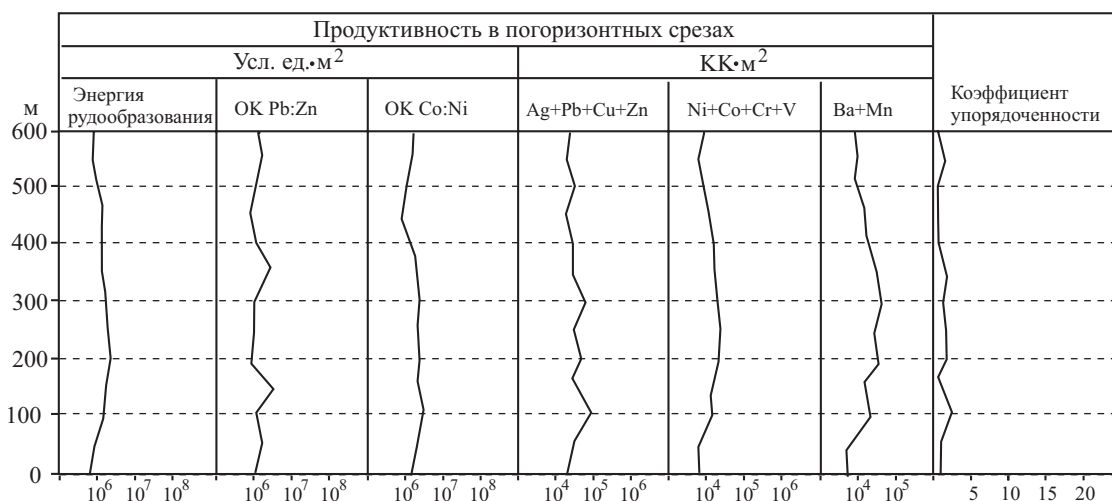


Рис. 3. Изменение с глубиной параметров АСГП зоны рассеянной минерализации (Синюхинское рудное поле, Горный Алтай)

ных характеристик АСГП (в виде продуктивностей соответствующих параметров в погоризонтных срезах) на примере месторождения Центральные Штоки Казского рудного поля (Горная Шория). Интервал развития золотого оруденения характеризуется максимальными значениями энергии рудообразования, коэффициента упорядоченности, сумм концентрирующихся и деконцентрирующихся элементов. В то же время максимум ОК Co:Ni приурочен к нижнерудной области, а ОК Pb:Zn и суммы (Ba+Mn) – к надрудной.

Для зон рассеянной минерализации концентрирование потока флюидов не характерно, поэтому отличительным признаком таких участков является отсутствие в их пределах концентрически зональных АСГП. Соответственно, коэффициент упорядоченности для любого среза такой структуры не выходит за пределы статистически незначимого уровня (рис. 3).

Для зон рассеянной минерализации характерно также неконтрастное и незакономерное изменение с глубиной продуктивностей всех геохимических показателей. В то же время, общий уровень накопления деконцентрирующихся элементов соответствует таковому для промышленных рудных тел, что указывает на достаточно высокий энергетический потенциал гидротермальной системы. Однако в условиях неблагоприятной тектонической обстановки концентрирования флюидных потоков не произошло и рудные (концентрирующиеся) элементы рассеялись вместе с деконцентрирующимися достаточно равномерно в большом объеме без формирования контрастных зональных структур.

Оценка уровня эрозионного среза АСГП ранга рудных полей представляет собой самостоятельную задачу. Исследование вертикальной зональности такого уровня на эталонных объектах возможно только при субгоризонтальном положении вектора зональности. Однако такие ситуации встречаются редко, в большинстве случаев мы имеем дело с поперечными срезами гидротермальных систем и

вынуждены реставрировать вертикальную зональность рудных полей по отдельным фрагментам, либо по принципу аналогии. Анализ опубликованных и полученных нами данных показывает, что подрудные и надрудные срезы рудных полей характеризуются сходством ряда параметров АСГП (степень упорядоченности, энергия рудообразования, спектр концентрирующихся элементов, морфология АСГП), но имеют и определенные отличия. При выдержанном в целом наборе концентрирующихся элементов соотношение их в процессе фильтрации флюидов закономерно меняется, поэтому для фронтальных зон рудных полей характерны положительные аномалии ОК Pb:Zn при отсутствии их в корневых зонах. Аномалии ОК Co:Ni, напротив, обычны для корневых зон и отсутствуют во фронтальных. Для корневых зон характерны также более высокие концентрации в метасоматитах и пирите Co, Ni, Cr, V. Для некоторых золоторудных полей Дальнего Востока отмечается, кроме того, относительное накопление в корневых зонах Ba и Mn [7], но полученные нами данные этого вывода не подтверждают.

Объективная оценка параметров АСГП по первичным ореолам в большинстве случаев возможна только для рудных тел и детально изученных месторождений. Плотность сети опробования корневых 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. На начальном этапе работ допустимо пользо-

ваться коэффициентами, выведенными для сходных ландшафтно-геохимических условий на других площадях.

В таблице приведены данные о средних значениях этих коэффициентов для золоторудных полей Сибири, сформировавшихся в алюмосиликатной среде. Для карбонатных пород отмечается существенное (в несколько раз) обогащение вторичных ореолов Ni, Co, Cr, V, Pb, Zn, Ba, поэтому для таких месторождений опытно-методические работы являются обязательными.

**Таблица.** Средние значения коэффициентов остаточной продуктивности  $k$  в золоторудных полях Сибири, сформировавшихся в алюмосиликатной среде (по данным Н.А. Рослякова [15])

Элемент	Au	Ag	Pb	Cu	Zn	Mo	Bi	Ba	Mn	Sr	Ni	Co	V	Cr
$\bar{k}$	1,5	0,5	2,2	0,7	1,4	1,7	0,7	0,9	1,0	0,6	1,1	0,9	0,9	1,4

Приведенные сведения и полученные нами данные указывают на то, что АСГП, выявленные в первичных полях, в целом сохраняют свою морфологию во вторичных аккумуляциях. Количественные параметры АСГП при этом в определенной степени искажаются и должны быть скорректированы в соответствии с вычисленными для каждого элемента коэффициентами остаточной продуктивности. Нарушаются также существовавшие в первичных ореолах корреляционные связи и возникают новые, поэтому ассоциации концентрирующихся и деконцентрирующихся элементов должны выделяться по результатам изучения первичных полей, либо по аналогии с эталонным объектом.

вичных ореолах корреляционные связи и возникают новые, поэтому ассоциации концентрирующихся и деконцентрирующихся элементов должны выделяться по результатам изучения первичных полей, либо по аналогии с эталонным объектом.

### Выводы

Предложена методика количественной оценки параметров аномальных геохимических полей, которая включает:

- геометризацию аномалий концентрирующихся и деконцентрирующихся относительно рудного тела элементов;
- расчет коэффициента упорядоченности аномальных структур геохимических полей;
- расчет продуктивности геохимических показателей (энергии рудообразования, коэффициентов относительной концентрации элементов, сумм концентрирующихся и деконцентрирующихся элементов).

Установлена зависимость между количественными параметрами аномальных структур геохимических полей и масштабами сопровождаемого ими золотого оруденения. Показана возможность оценки эрозионного среза месторождений и рудных полей по значениям этих параметров, определены критерии отличия промышленных рудных тел и зон рассеянной (непромышленной) минерализации.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соловов А.П. Геохимические методы поисков месторождений полезных ископаемых. – М.: Недра, 1985. – 294 с.
2. Инструкция по геохимическим методам поисков рудных месторождений / Под ред. Л.Н. Овчинникова. – М.: Недра, 1983. – 198 с.
3. Методические рекомендации по литохимическим методам поисков рудных месторождений по потокам рассеяния / Г.И. Хорин, В.П. Бородин, А.А. Матвеев. – М.: ИМГРЭ, 1992. – 164 с.
4. Поисковые модели вторичных литохимических ореолов месторождений благородных, цветных и редких металлов / Сост. В.И. Морозов, Н.А. Серебрякова и др. – М.: ИМГРЭ, 1992. – 90 с.
5. Матвеев А.А., Николаев Ю.Н., Аплеталин А.В. Геолого-геохимические модели рудных объектов различных иерархических уровней // Прикладная геохимия. – Вып. 3. – М.: ИМГРЭ, 2002. – С. 86–106.
6. Милаев С.А., Чекваидзе В.Б., Исакович И.З. Количественная минералого-геохимическая модель Васильковского золоторудного месторождения // Отечественная геология. – 1994. – № 7. – С. 36–42.
7. Соколов С.В. Структуры аномальных геохимических полей и прогноз оруденения. – СПб.: Наука. – 1998. – 131 с.
8. Плюшев Е.В., Шатов В.В. Геохимия и рудоносность гидротермально-метасоматических образований. – Л.: Недра, 1985. – 247 с.
9. Питулько В.М., Крицук И.Н. Основы интерпретации данных поисковой геохимии. – Л.: Недра, 1990. – 336 с.
10. 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.
11. Сафронов Н.И., Мешеряков С.С., Иванов Н.П. Энергия рудообразования и поиски полезных ископаемых. – Л.: Недра, 1978. – 265 с.
12. Григорян С.В. Первичные геохимические ореолы при поисках и разведке рудных месторождений. – М.: Недра, 1987. – 408 с.
13. Росляков Н.А. Проблемы количественного геохимического прогноза рудных месторождений // Геохимические критерии прогнозной оценки оруденения / Отв. ред. Н.А. Росляков. – Новосибирск: Наука, 1990. – С. 193–214.

Поступила 07.09.2006 г.