

Литература



по геологии

---

«Наука»

---

**Геохимические  
методы  
и научно -  
технический  
прогресс  
в геологическом  
изучении недр**

---

АКАДЕМИЯ НАУК СССР  
МИНИСТЕРСТВО ГЕОЛОГИИ СССР

МЕЖДУВЕДОМСТВЕННЫЙ СОВЕТ ПО ПРОБЛЕМЕ  
"НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ ГЕОХИМИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ПОИСКОВ  
МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ"

ИНСТИТУТ МИНЕРАЛОГИИ, ГЕОХИМИИ  
И КРИСТАЛЛОХИМИИ РЕДКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

5148

# ГЕОХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ И НАУЧНО- ТЕХНИЧЕСКИЙ ПРОГРЕСС В ГЕОЛОГИЧЕСКОМ ИЗУЧЕНИИ НЕДР

Сборник научных трудов

Ответственные редакторы:  
кандидаты геолого-минералогических наук  
Э.К. Буренков, В.И. Морозов



МОСКВА "НАУКА" 1989



Геохимические методы и научно-технический прогресс в геологическом изучении недр. - М.: Наука, 1989. - 208 с. - ISBN 5-02-003227-1

В сборнике представлены материалы, характеризующие современное состояние и перспективы совершенствования традиционных геохимических методов, вопросы их технологического и аналитического обеспечения; рассматриваются проблемы выявления и интерпретации слабых сигналов-признаков скрытого или перекрытого оруденения; объясняется природа формирования геохимических аномалий в аллохтонных отложениях. На конкретных примерах показаны геологическая эффективность современных геохимических технологий, приемы количественной интерпретации, позволяющие решать широкий круг прогнозно-поисковых геохимических задач на разных стадиях геологоразведочного процесса.

Для геологов, геохимиков и геофизиков.

Рецензенты А.Г.Жабин, В.В.Иванов

Редактор Т.Б. Гришина

The book consist of papers characterizing modern state and prospects of perfection of conventional geochemical methods, questions of their technological and analytical fulfilment. Identification and interpretation of weak signals-signs of hidden or buried mineralization is considered; nature of geochemical anomalies formation in allochtonous deposits is explained. Examples show a geological effectiveness of modern geochemical technology, methods of quantitative interpretation which allow to solve numerous prediction-exploration problems at different stages of geologo-prospecting work.

Attention for geologists, geochemists and geophysists.

## ВВЕДЕНИЕ

3 февраля 1988 г. исполнилось 80 лет Александру Петровичу Соловову – доктору геолого-минералогических наук, профессору геологического факультета МГУ им.М.В.Ломоносова, заслуженному геологу РСФСР, почетному разведчику недр СССР. Имя А.П.Соловова хорошо известно в широких кругах геологов, геохимиков и геофизиков нашей страны и за рубежом. Он является одним из основоположников нового, высокоэффективного научного и практического направления в геологии – геохимических методов поисков рудных месторождений, обеспечивших коренное улучшение теории и практики геологопоисковых и разведочных работ в рудных районах СССР и приведших к открытию крупных промышленных месторождений цветных, редких и благородных металлов.

А.П.Солововым опубликовано свыше 170 научных работ. Он является автором первого в мире учебника "Геохимические методы поисков месторождений полезных ископаемых" (1985 г.), переведенного на английский язык (1987 г.), соавтором двух учебных пособий "Геохимические методы поисков рудных месторождений", а также автором и соавтором утвержденных Министерством геологии СССР в качестве обязательных "Инструкций по металлометрическим съемкам" (1951 и 1957 гг.) и "Инструкций по геохимическим методам поисков рудных месторождений" (1965 и 1983 гг.). Эти инструкции сыграли исключительную роль в широком развитии и применении в СССР геохимических методов поисков рудных месторождений.

Большинство работ А.П. Соловова посвящено развитию теоретических основ геохимических методов поисков, в первую очередь, применительно к поискам рудных месторождений. А.П.Соловов впервые разработал физико-математическую теорию формирования гипергенных ореолов и потоков рассеяния рудных месторождений, создал классификацию вторичных ореолов рассеяния, предложил методы оценки выявляемых объектов по геохимическим характеристикам гипергенных аномалий. Им разработаны также методы оценки прогнозных ресурсов металлов на различных стадиях геологоразведочного процесса, которые обеспечивают обоснованный выбор первоочередных объектов и позволяют максимально сократить вовлечение в предварительную разведку непромышленных рудопроявлений. Большое место в работах А.П.Соловова отводится вопросам исследования эндоген-

ной геохимической зональности рудных месторождений в связи с проблемой поисков слепых рудных тел; им обоснован принцип геометрического и геохимического подобия генетически однотипных месторождений, что наряду с исследованием зональности на ЭВМ позволяет прогнозировать оруденение на глубину.

Педагогическую работу А.П.Соловов ведет с 1946 г. в МИРИ им.С.Орджоникидзе, Казахском политехническом институте и с 1964 г. по настоящее время на геологическом факультете МГУ. По приглашениям он читал курсы лекций во многих вузах СССР и за рубежом.

Александр Петрович известен как блестящий лектор, его содержательные лекции читаются им живо, темпераментно и доступно. Под руководством проф. А.П.Соловова прошли обучение сотни студентов и слушателей курсов, им подготовлено более 30 кандидатов наук, в том числе из АРЕ, Судана, Бирмы, НРБ, Гвинеи, Мадагаскара и Чада.

А.П.Соловов поддерживает творческие связи со многими научными и производственными организациями, неустанно пропагандирует новейшие достижения в области геохимических методов поисков и активно участвует в их практическом внедрении. При активном участии А.П.Соловова в СССР создана школа высококвалифицированных специалистов в области геохимических поисков, пользующаяся признанием и авторитетом во всем мире.

Талант ученого, огромная научно-практическая эрудиция, любовь к педагогической деятельности сочетаются в Александре Петровиче с высокими человеческими качествами - исключительной честностью, принципиальностью, чуткостью, отзывчивостью к людям, личным обаянием. А.П.Соловову присущи лучшие качества талантливого ученого и блестящего организатора, практика и педагога. Вся многогранная научная деятельность А.П.Соловова тесно связана с практикой и служит главной цели нашей геологической службы - развитию минерально-сырьевой базы страны.

В материалах настоящего сборника, посвящаемого юбилею А.П.Соловова, отражены результаты исследования ряда известных специалистов по совершенствованию теории и практики геохимических методов поисков, разработке и обоснованию новых научных направлений, способствующих неуклонному повышению эффективности поисковой геохимии, к когорте создателей которой принадлежит и А.П.Соловов.

Искренне поздравляя А.П.Соловова с 80-летним юбилеем, авторский коллектив желает ему еще многих и многих лет активной творческой деятельности!

## ОЦЕНКА ПРОГНОЗНЫХ РЕСУРСОВ НА ОСНОВЕ ПРИНЦИПА ПОДОБИЯ

В свете современных требований к оценке геохимических аномалий и рудопроявлений, выявляемых литохимическими сьемками различных масштабов, обязательным является подсчет прогнозных ресурсов металлов по категориям  $P_3 - P_2 - P_1$  [3]. Эти цифры служат объективным критерием для выделения первоочередных объектов и максимального сокращения числа непромышленных рудопроявлений, вовлекаемых в предварительную разведку. Широкие возможности для оценки прогнозных ресурсов рудопроявлений и геохимических аномалий в метрике эталонных месторождений обеспечивает принцип геометрического и геохимического подобия генетически однотипных объектов различных классов крупности [2, 4, 5].

Наиболее простое и наглядное подтверждение геометрического подобия обнаруживают генетически однотипные рудные тела. Известно, например, что залежи медноколчеданных руд Среднего и Южного Урала обычно имеют линзообразную форму, в их числе встречаются линзы большого, среднего и малого размера. Рудные жилы могут различаться по мощности, по длине и по протяженности на глубину; при этом возрастание одного из линейных размеров сопровождается пропорциональным увеличением двух других. Месторождения медно-порфировых руд по своей морфологии нередко напоминают "опрокинутую чашу", различаясь по своим размерам. Геометрическими фигурами подобия являются также пластовые и штокверковые месторождения различной крупности. Таким образом, генетически однотипные месторождения, отличаясь по своим объемам и запасам полезного ископаемого, характеризуются близкой формой с устойчивыми соотношениями между линейными размерами залежей. Естественно, что этот признак проявлен лишь в известных пределах, а именно при условии, что проводимая аналогия между однотипными месторождениями учитывает своеобразие каждого из сопоставляемых объектов. Вместе с тем в пределах рудных районов со сходным геологическим строением соотношения между размерами будут составлять величины, близкие к постоянным.

Помимо геометрических размеров, месторождения одного рудно-формационного типа характеризуются относительным постоянством содержаний основных металлов в рядовых рудах. Так, содержания меди в первичных рудах месторождений медно-порфировой формации лежат в пределах 0,6–1,0% меди, поднимаясь до более высоких значений 1,3–1,5% только в зонах вторичного сульфидного обогащения. Для медноколчеданных месторождений наиболее характерны средние содержания меди 2,5–4,0%, реже 6–8%. В рудах полиметаллических месторождений содержания суммы свинца и цинка обычно лежат в пределах 5–10% и только для месторождений с богатыми рудами поднимаются до 25–40%. Хотя по экономическим сооб-

ражениям требования к средним содержаниям металлов в рудах мелких месторождений нередко увеличиваются по сравнению с крупными, для анализа генерализованных зависимостей это существенного значения не имеет. Поэтому эквивалентом запасов металла  $Q$  в месторождениях являются объемы рудных залежей  $V$ , и сравнительную характеристику однотипных объектов различного объема определяет их коэффициент линейного подобия  $\alpha$ .

Две генетически однотипные залежи, являющиеся фигурами подобия, характеризуются величиной отношения между их линейными размерами и геохимическими характеристиками - длинами по простиранию ( $L$ ) мощностями ( $2a$ ), протяженностями на глубину ( $H$ ) или линейными продуктивностями оруденения ( $M$ ,  $m\%$ ):

$$\alpha = L_1 : L_2 = a_1 : a_2 = H_1 : H_2 = M_1 : M_2. \quad (1)$$

Между площадными характеристиками двух фигур подобия будет соблюдаться соотношение

$$P_1 : P_2 = S_1 : S_2 = \alpha^2, \quad (2)$$

а между их объемами и запасами металла -

$$V_1 : V_2 = Q_1 : Q_2 = \alpha^3.$$

Если принять десятичную классификацию месторождений по масштабам промышленных запасов, то для любых генетически однотипных объектов среднего размера смежных классов крупности коэффициент подобия определится из выражения  $\alpha = \sqrt[3]{10} = 2,15$ , а соотношения между линейными характеристиками мелких, средних и крупных месторождений - соответственно из зависимостей

$$\sqrt[3]{Q_{\text{мелк}}} : \sqrt[3]{Q_{\text{сред}}} : \sqrt[3]{Q_{\text{круп}}} = \sqrt[3]{1} : \sqrt[3]{10} : \sqrt[3]{100} = 1 : 2,15 : 4,64. \quad (4)$$

Соотношения между площадными показателями составят

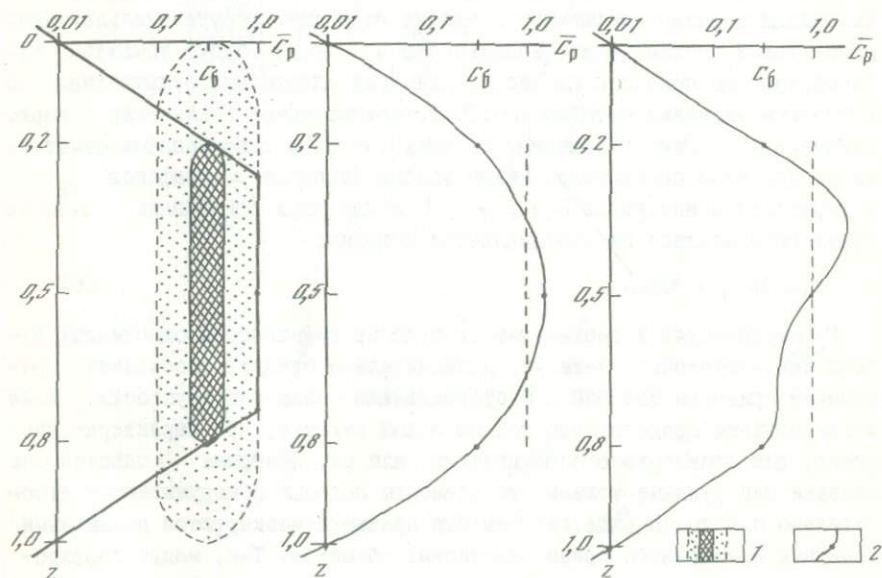
$$S_{\text{мелк}} : S_{\text{сред}} : S_{\text{круп}} = (\sqrt[3]{1})^2 : (\sqrt[3]{10})^2 : (\sqrt[3]{100})^2. \quad (5)$$

Указанные зависимости характеризуют объекты, отвечающие центрам классов (или занимающие в них одинаковое положение), поскольку десятичные классы имеют ширину от  $0,316n$  до  $3,16n$ .

Каждое рудное тело, если оно не уничтожено эрозией или не срезано тектоническими нарушениями, имеет верхнюю и нижнюю выклинки и во всех направлениях окружено постепенно или более резко убывающими содержаниями металла. Согласно идеализированной модели эндогенного рудообразования, отложение основных рудных компонентов происходит в режиме насыщения и характеризуется сравнительно постоянными значениями средних содержаний (или продуктивностей) оруденения в интервале промышленных руд. В надрудной и подрудной частях средние содержания, или продуктивности, основных рудных компонентов убывают по экспоненциальному закону в сторону верхней и нижней выклинок первичного ореола. В условной метрике общей вертикальной протяженности месторождения от верхней границы первичного ореола основного рудного элемента ( $z = 0,0$ ) до нижней ( $z = 1,0$ ) - интервал промышленных руд, в пределах которого

средняя продуктивность оруденения (или среднее содержание) остается относительно постоянной ( $\bar{C}_p, M_p, P_p = \text{const}$ ), заключен в границах  $0,2 \leq z \leq 0,8$ . Такие генерализованные модели для средних содержаний основного рудного компонента показаны на рис. I. Аналогичные графики можно получить, если по оси абсцисс вместо средних содержаний откладывать нафтоновые количества металла ( $M, \text{м\%}$ ) в горизонтальных сечениях рудной зоны. Опыт показывает, что графиками этих типов аппроксимируются многие рудные месторождения, хотя приведенными моделями не исчерпывается все разнообразие природных зависимостей.

Формирование месторождений различных рудно-формационных типов протекает с участием большого числа элементов-спутников оруденения.



Р и с. I. Генерализованные модели изменений средних содержаний рудного элемента в рудной зоне

1 - рудное тело и его первичный ореол; 2 - графики  $\bar{C}_p = f(z)$  в метрике 0,0-1,0

Максимумы отложения этих элементов в рудной зоне располагаются в определенной зональной последовательности относительно ценного металла по глубине, по отношению к вулканическим аппаратам или береговой линии в случае осадочного рудообразования. Для рассмотренной модели оруденения результаты исследования зональности месторождений сводятся к установлению рядов последовательного отложения рудных элементов по вертикали и к отысканию геохимических показателей  $\nu$ , односторонне (монотонно) изменяющихся в интервале от  $z = 0,0$  до  $z = 1,0$ . Такими показателями зональности служат безразмерные отношения между сре-

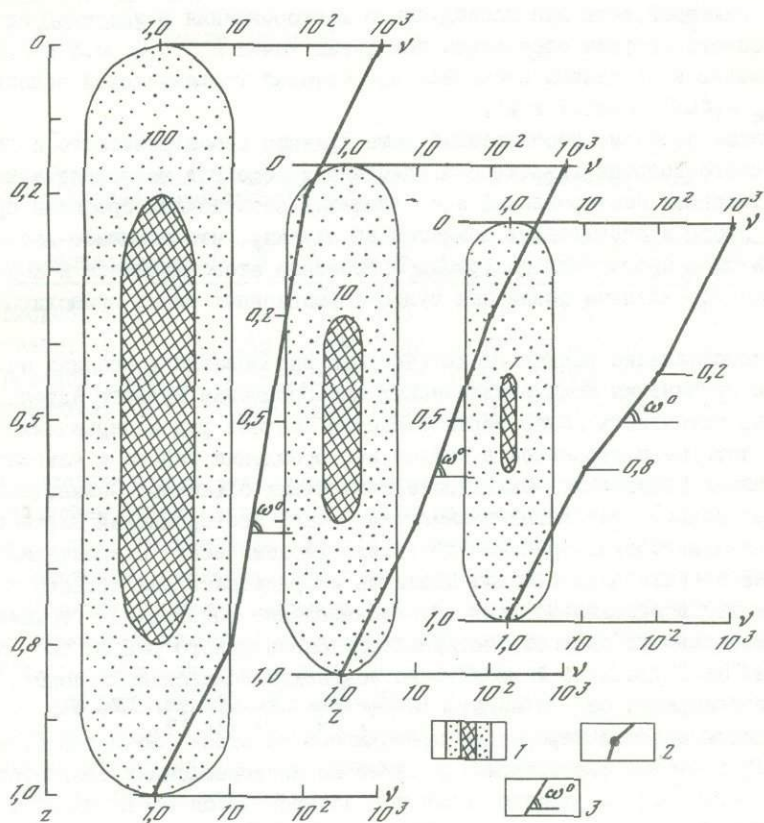
дними надфоновыми содержаниями (или линейными продуктивностями) двух или нескольких химических элементов, типоморфных для данного оруденения. Природные соотношения между содержаниями рудных элементов в контуре оруденения могут изменяться самым различным образом, поэтому отыскание геохимических показателей, монотонно изменяющихся с глубиной, производится на ЭВМ по данным погоризонтного опробования хорошо разведанных ("эталонных") месторождений главнейших промышленных типов. Наилучшим образом эта задача решается по программам "Ню-2" и "Ню-3", разработанным на кафедре геохимии МГУ (авторы В.А.Николаев, Ю.В.Шваров). Если числитель этих отношений представлен элементами низко- и среднетемпературной ассоциации, тяготеющих к верхним горизонтам рудной зоны, а знаменатель - элементами высокотемпературной ассоциации, накапливающимися в нижних горизонтах оруденения, величины показателей геохимической зональности  $v_z = f(z)$  будут убывать с глубиной, как это показано на рис.2. Для трех однотипных рудных линз с условными запасами металла 100:10:1 геохимические показатели  $v$  имеют одинаковую численную величину во всех точках с одноименными отметками  $z$ . При этом соотношения между углами наклонов  $\omega$  графиков  $v_z$  к горизонту в интервале  $0,2 \leq z \leq 0,8$  для двух однотипных объектов будут определяться их коэффициентом подобия:

$$x_v = \operatorname{tg} \omega_1 : \operatorname{tg} \omega_2 \quad (6)$$

Геометрическое и геохимическое подобие генетически однотипных рудных тел достаточно очевидно; дополнительно следует обосновать применение принципа подобия к месторождениям различной крупности. Если месторождение представлено только одной залежью, что характерно, например, для штокверкового оруденения, или разобценными однотипными линзами или рудными телами, то элементы подобия обнаруживаются относительно просто. В ряде случаев эти признаки маскируются различными уровнями эрозийного среза однотипных объектов. Так, медно-порфировые месторождения при малом эрозийном срезе ( $z < 0,5$ ) имеют в плане изометрическую форму, а при глубоком срезе приобретают характер кольцевых залежей с безрудным центральным ядром. Крупное месторождение нередко отличается от однотипного мелкого не только размерами входящих в него рудных тел, но и их числом, сохраняя при этом черты подобия. Известны золотокварцевые месторождения, включающие до 300 рудных жил, фигурами подобия которых могут считаться месторождения, объединяющие 20-30 или 100-150 жил того же типа. Для таких месторождений возможно построение генерализованных моделей и установление вертикальной геохимической зональности для рудной зоны в целом, без выделения отдельных рудных тел в соответствии с рис.1.

Характерными примерами полного подобия служат вертикальные разрезы (разведочные профили) по простиранию любого рудного тела. Их коэффициенты подобия могут заведомо различаться, характеризуя раздувы по

мощности и растянутость оруденения на глубину ( $\mathcal{A} > 1,0$ ) или его пережимы и сжатость ( $\mathcal{A} < 1,0$ ) по отношению к опорному (эталонному) разрезу.



Р и с. 2. Сечения генетически однотипных рудных линз с графиками показателя зональности  $\nu$

1 - Рудное тело и его первичный ореол; 2 - график  $\nu_z = f(z)$ ; 3 - угол наклона графиков к горизонту в рудном интервале

Построение формализованной модели изучаемого оруденения предполагает погоризонтное геохимическое опробование детально разведанного месторождения определенного генетического типа от верхних горизонтов надрудного первичного ореола до нижних горизонтов подрудного ореола, включая интервал промышленного оруденения. Во многих случаях в пределах одного разведочного профиля или одного рудного тела охватить литохимическим опробованием весь интервал от  $z = 0,0$  до  $z = 1,0$  не удастся из-за отсутствия верхней эродированной части оруденения или недостаточной глубины разведочных выработок, не достигших подрудного интервала. В этих условиях на принципе подобия путем пересчета дан-

ных по различным профилям и рудным телам возможно их совмещение с построением единой обобщенной модели оруденения, реконструкцией эродированной части и прогнозом оруденения на глубину. Задача может считаться решенной, если для исследуемого месторождения в условной метрике эталонного профиля определены положения точек  $z = 0,2; 0,5$  и  $0,8$  по отношению к численным значениям показателей геохимической зональности  $v_z = f(z)$  (рис. 1 и 2).

Таким образом, обоснованный выше принцип геометрического и геохимического подобия генетически однотипных объектов позволяет в метрике эталонных месторождений или отдельных разведочных профилей проводить прогноз оцениваемых объектов на глубину, что повышает достоверность цифр прогнозных ресурсов. Приложение этого принципа к конкретным месторождениям различных рудно-формационных типов приводится ниже.

Сопоставление данных геохимического опробования и анализа зональности оруденения полиметаллических месторождений Рудного Алтая позволило установить общие черты сходства состава руд и первичных ореолов, которые повторяются в каждом месторождении района и находят отражение в эндогенной зональности конкретных объектов. Совместное изучение восьми колчеданно-полиметаллических месторождений Зырянского и Лениногорского районов позволило геохимически охарактеризовать каждый из этих двух близких подтипов и предложить для каждого из них различные поисковые модели [1]. Исследование эндогенной геохимической зональности четырех месторождений Зырянского района по программе "Ню-2" выявило 17 монотонно убывающих показателей зональности второго порядка общего вида:  $v = \frac{Hg, Cd, Sb, Ba, Ag, Pb, Zn}{Cu, Mo, Co, Bi, Sn}$ . Обработка геохимической информации проводилась по схеме "объектов 4, минимум 4" с числом опробованных уровней на месторождениях соответственно 5, 4, 33 [4]. Из общего числа показателей зональности выбраны семь с максимальным размахом значений  $v (R = v_{max}/v_{min})$  и без участия в них главных рудных компонентов - свинца и цинка. При расчетах геохимические параметры профиля 6 Зырянского месторождения были приняты за эталон и условно приравнены к единице. По отношениям тангенсов углов наклона графиков  $v_z$  оцениваемого и эталонного месторождений определены средние значения  $\bar{x}_v$  и величины доверительных интервалов оценок. Одновременно получены устойчивые величины линейных продуктивностей основных рудных элементов (рис. 3) и по их отношению к эталону оценены  $\bar{x}_M$ . В качестве показателя подобия в дальнейшем принята величина среднего геометрического  $\bar{x} = \sqrt{\bar{x}_v \cdot \bar{x}_M}$  (табл. I).

Показатель подобия  $\bar{x}$  позволяет определить соотношение между полной протяженностью рудных интервалов двух объектов и их полными ресурсами. Реальные ресурсы требуют оценки уровня эрозионного среза рудопроявления по графикам показателей зональности в метрике эталонного месторождения:

$$Q_H = \frac{0,8-z}{0,6} \cdot z^3 \cdot Q_{\text{полн.эталона}} \quad (7)$$

Аналогично может быть определена реальная протяженность на глубину оцениваемого объекта

$$H = \frac{0,8-z}{0,6} \cdot z \cdot H_{\text{полн.эталона}} \quad (8)$$

Т а б л и ц а I

Результаты оценки  $Q_H$  по  $z$ ,  $z$  колчеданно-полиметаллических месторождений Зырянского района

Месторождение; профиль	$\bar{z}_v, \varepsilon^{\pm 1}$	$\bar{z}_M$	$z$	$\bar{z} \pm s/\sqrt{n}$	$Q_H$ , усл. ед.
Зырянское; 6	-	1,0	1,0	0,2	7,9
Греховское; 0	0,58 · 1,12 $\pm$ 1	0,41	0,49	0,38 $\pm$ 0,08	0,7
Снегиревское; 05	0,48 · 1,21 $\pm$ 1	0,53	0,50	0,47 $\pm$ 0,07	0,5
Богатыревское; 5	0,46 · 1,18 $\pm$ 1	0,37	0,41	0,56 $\pm$ 0,09	0,2

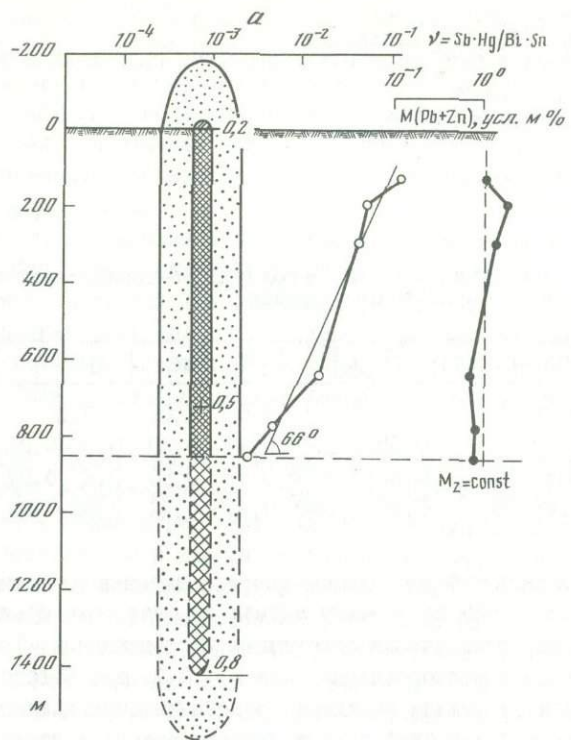
Полная протяженность эталонного разреза Зырянского месторождения была получена путем построения модели за счет совмещения графиков  $v_z$  в общих точках генетически однотипных месторождений. Такими точками для Зырянского месторождения была  $z = 0,2$ ; для Богатыревского -  $z = 0,8$ . Верхние и нижние выклинки оруденения определялись по графикам  $M_z$  суммарной линейной продуктивности свинца и цинка по признаку устойчивого убывания величины  $M_z$  по восстанию  $z < 0,2$  или по падению  $z > 0,8$  рудного тела. По значениям геохимических показателей зональности соответственно для верхней  $v_{0,2}$  и нижней  $v_{0,8}$  выклинок оруденения и углу наклона  $\omega$  графика  $v_z$  оценивалась полная протяженность эталонного объекта:

$$H_{\text{полн.эталона}} = \lg\left(\frac{v_{0,2}}{v_{0,8}}\right) ab \operatorname{tg} \omega, \quad (9)$$

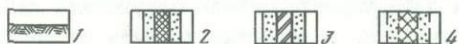
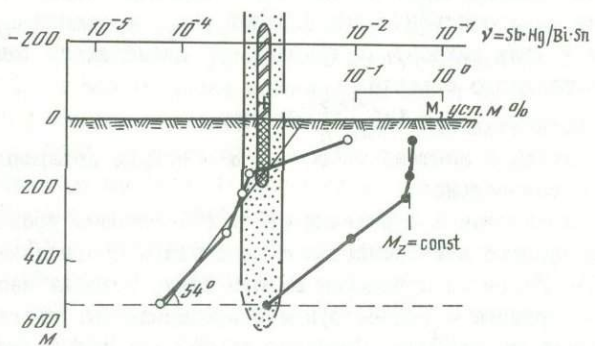
где  $a$  - линейный масштаб по оси  $z$ ;  $b$  - модуль логарифмического масштаба по оси абсцисс.

Путем подстановки в выражения (7) и (8) оценены уровни эрозийного среза каждого месторождения и подсчитаны прогнозные ресурсы (см. табл. I). На рис. 3 приведены модели фигур подобия месторождений Зырянского района с реконструкцией эродированных частей и резервом оруденения на глубине. Несмотря на то, что проведенные расчеты имеют ориентировочный характер из-за отсутствия данных по всему рудному интервалу эталонного объекта, прогнозная оценка ресурсов изученных месторождений хорошо совпала с данными разведки.

Оценка прогнозных ресурсов металлов в выявляемых месторождениях с помощью показателя подобия будет особенно надежна, если в качестве эталона выбрать объект, геохимически охарактеризованный от надрудных до подрудных интервалов оруденения. На рис. 4 приведены геохи-

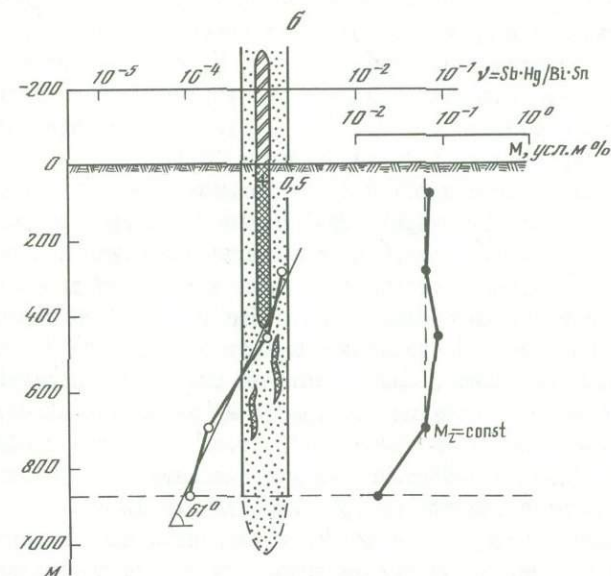


б

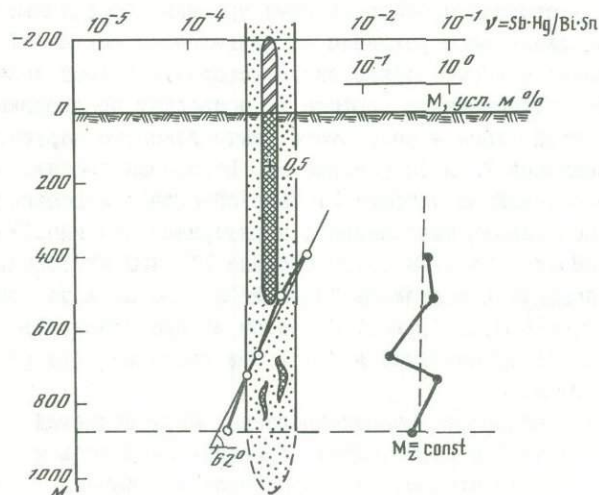


Р и с.3. Модели для фигур подобия месторождений Зырянского района

- 1 - дневная поверхность; 2 - рудные тела и их первичные ореолы;  
 3 - часть рудного тела и первичного ореола, уничтоженного эрозией;  
 4 - предполагаемое продолжение рудного тела на глубину; 5 - отметка



в



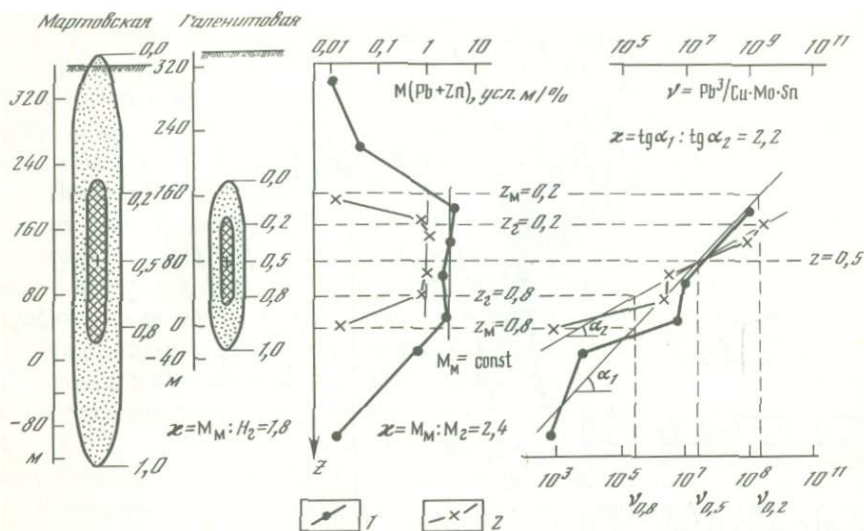
центра рудного тела; 6 - графики  $v$ ; графики  $M_z$ ; 8 - уровень геохимической изученности месторождений

Месторождения: а - Зырянское, б - Снегиревское, в - Греховское, г - Богатыревское

мическая характеристика двух слепых залежей скарново-полиметаллического месторождения в Приморье и частные оценки показателей подобия, полученные независимыми методами через  $N$ ,  $M_z$  и  $v_z$ . За показатель подобия была принята величина среднего геометрического из трех определений, которая составила  $\mathcal{E} = 2,1 \cdot I, I^{\pm 1}$ . Отсюда отношение полных геохимических ресурсов двух залежей близко к  $10:1$ .

В метрике эталонного профиля VI медноколчеданного месторождения Приорское (Северные Мугуджары) были оценены положения рудных пересечений, вскрытых скв. I7 и скв. 8 на разведочном профиле X, ограничивающем колчеданную залежь с юго-востока. Для оценки использовались десять геохимических показателей зональности I-го и 2-го порядков, выявленных при исследовании зональности месторождения по программе "Ню-2". Средняя величина оценки положения скв. I7 с доверительными интервалами ( $z_{\pm s}/Vn$ ) составила  $106,0 \pm 6,4$  м (за начало отсчета 0 м принято положение скв. I5 в профиле VI), т.е. в метрике профиля VI она занимает условное положение между скважинами I0 и I6, отвечая верхнему рудному пересечению (рис.5). Высокая сходимость отдельных оценок  $z_1$  свидетельствует о надежности выбранных для таксации показателей зональности. По численным значениям тех же показателей, вычисленных для рудного интервала, вскрытого скв. 8, она однозначно занимает положение ниже 5-го уровня профиля VI (скв. I9). По полученным данным построен сводный профиль из семи уровней, объединяющий пересечения рудной линзы месторождения по разведочным линиям VI и X (см. рис.5). Положение в этом профиле скв. 8, соответствующей нижнему рудному горизонту оруденения на профиле X, позволяет предположить смещение части рудной линзы в результате тектонического нарушения, фиксируемого скважинами I9 и 22 (см. рис.5). Возможная протяженность рудного тела по падению на профиле VI была оценена с использованием коэффициента подобия  $\mathcal{E}$ , вычисленного в интервале сечения I7-8 профиля X (протяженность 125 м) и I5-I9 профиля VI (420 м). Зональная характеристика профиля X оказалась "сжатой" в 6,56 раза по сравнению с профилем VI  $\mathcal{E} \cdot e^{\pm 1} = 0,15 \cdot I, I2^{\pm 1}$ : С учетом  $\mathcal{E}$  протяженность рудной зоны на профиле VI оценивается в 770 м при протяженности разведанного интервала 420 м.

При анализе зональности медноколчеданных месторождений Кусмурун (Восточный Казахстан) и Кафан (Южная Армения) выявилось их значительное геохимическое сходство. Оно выражается в близости зональных рядов отложения рудных элементов типоморфного комплекса этих месторождений (значение рангового коэффициента между частными рядами зональности составило +0,82) и наличии восьми геохимических показателей зональности I-го и 2-го порядков, общих для двух сравниваемых месторождений. Наличие общих показателей позволило провести оценку (таксацию) уровней Кафанского месторождения в метрике разведочных профилей III и IV месторождения Кусмурун. Результаты оценки представлены в табл.2.



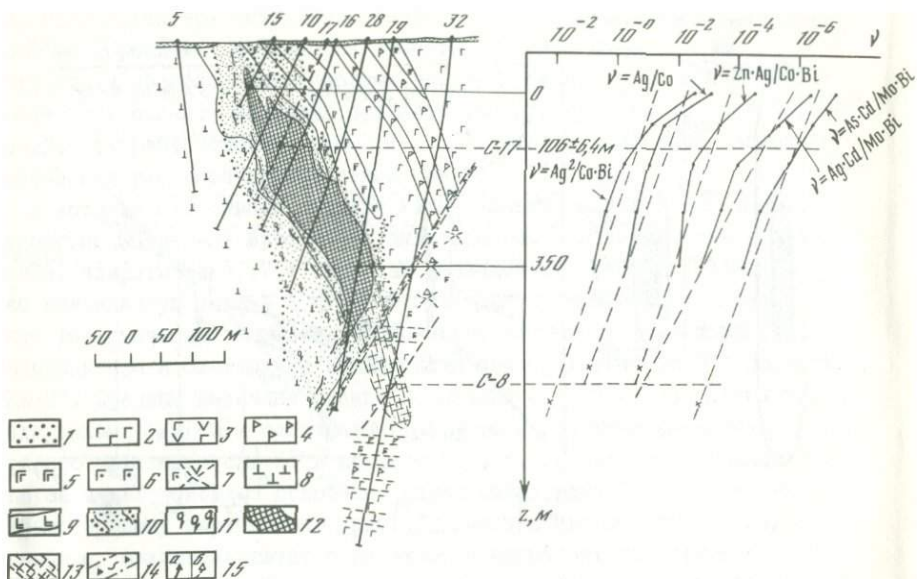
Р и с.4. Модели для фигур подобия с оценками  $\bar{x}$  Мартовской (I) и Галенитовой (2) залежей Садового месторождения

Таблица 2

Оценка уровней месторождения Кафан в метрике месторождения Кусмурун

Уровни месторождения Кафан абс.отм. в м	Оценка в метрике месторождения Кусмурун, $\bar{x} \pm s/\sqrt{n}$ по восьми $\nu$
I, 1095	- 3,25 $\pm$ 0,31
II, 1045	- 2,49 $\pm$ 0,24
III, 1009	- 2,33 $\pm$ 0,44
IV, 969	- 1,14 $\pm$ 0,30
V, 849	0,51 $\pm$ 0,27

Приведенные в таблице данные позволяют сделать вывод о более глубоком уровне эрозийного среза месторождения Кусмурун. В общей колонке зональности двух сравниваемых месторождений рассматриваемые интервалы оруденения месторождения Кафан в пределах уровней I-V отвечают верхним горизонтам месторождения Кусмурун, уничтоженных к настоящему времени процессами денудации.



Р и с.5. Месторождение Приорское; сводный геолого-геохимический разрез по линиям VI и X; геологическая основа по М.И. Вахрушеву

1 - пески; 2 - диабазы, долериты, спилиты; 3 - андезит-базальты; 4 - андезитовые порфириты; 5 - габбро-диабазы; 6 - диабазовые порфириты; 7 - миндалекаменные андезит-базальты; 8 - липариты, липарито-дациты; 9 - липаритовые порфиры; 10 - гидротермально измененные породы; 11 - кварцевые и серицит-кварцевые породы; 12 - рудное тело; 13 - предполагаемое рудное тело; 14 - тектоническое нарушение; 15 - разведочные скважины; а - профиль VI, б - профиль X

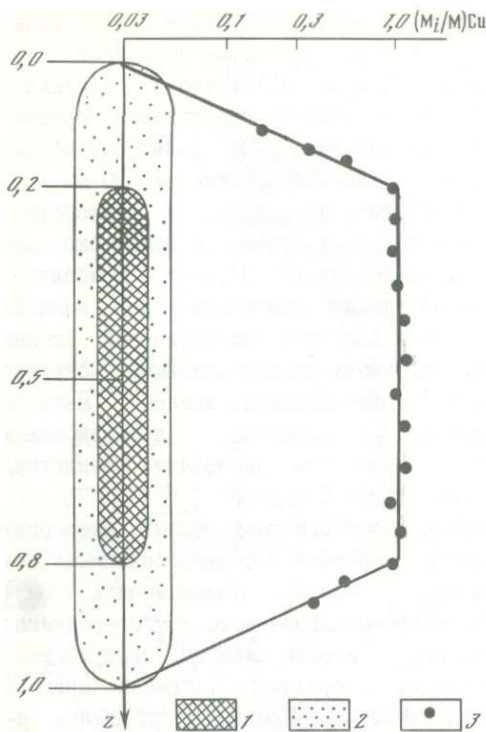
Оценка возможной протяженности недоразведанной части рудной зоны месторождения Кафан проведена с учетом коэффициента подобия, вычисленного через отношения тангенсов углов наклонов графиков геохимических показателей зональности, общих для двух месторождений, согласно зависимости (6). Его среднее значение составило  $0,51 \cdot 1,13^{\pm 1}$  (по восьми  $\nu$ ), т.е. зональность месторождения Кафан оказывается "сжатой" относительно месторождения Кусмурун, в 1,94 раза. Это подтверждается независимым расчетом  $\mathcal{Z}$  по вертикальной протяженности продуктивной части оруденения двух сравниваемых месторождений в выбранной метрике условных уровней. Реальная протяженность рудной зоны по падению месторождения Кусмурун от уровня 0,5 (верхнерудный горизонт) до уровня 4,5 (нижнерудный) составляет 550 м, среднее расстояние между уровнями 137 м. Протяженность оруденения месторождения Кафан в пределах уровней I-Y, равная 249 м, в метрике месторождения Кусмурун

определяется величиной 3,76 уровня – среднее расстояние между уровнями 65 м, что определяет значение  $\lambda = 2,1$ . С учетом известной протяженности оруденения месторождения Кусмурун и "сжатости" зональных характеристик месторождения Кафан можно ожидать продолжения промышленного оруденения на этом месторождении ниже У-го уровня (849 м) еще на глубину  $\sim 260$  м, ориентировочно до абсолютной отметки 590 м.

Примером сравнительной оценки генетически однотипных месторождений на основе принципа подобия может служить также геохимическое сопоставление двух медно-порфириновых месторождений Северного Прибалхашья – Коунрад и Сокуркой [2]. По отношениям тангенсов углов наклона графиков семи показателей зональности для двух месторождений оценка коэффициента геометрического подобия между месторождениями Сокуркой и Коунрад составила  $\lambda = 0,27 \cdot 1,07^{\pm 1}$ , откуда полные запасы металла месторождений Сокуркой  $Q_C$  и Коунрад  $Q_K$  находятся в соотношении  $Q_C = \lambda^3 Q_K = 0,02 Q_K$ . Полученные результаты определяют очевидную нецелесообразность разведки месторождения Сокуркой.

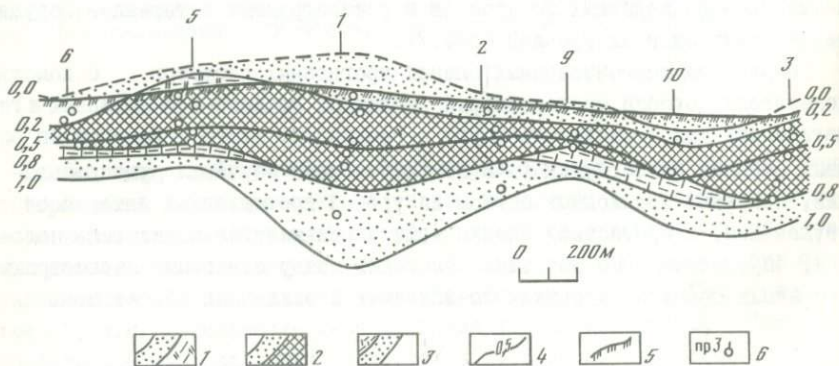
5148  
Обобщенная геолого-геохимическая характеристика рудных месторождений, как отмечалось выше, наглядно выражается формализованными моделями оруденения в координатах ( $z$ ,  $C_p$  или  $M_p$ ). Такая модель была построена для Лекын-Тальбейского медно-молибденового месторождения (Полярный Урал) путем совмещения нормированных линейных продуктивностей меди ( $m_1/M$ ) по восьми разведочным профилям [6]. Оценки средней величины  $z$  проводились в метрике эталонного профиля 7 по девяти геохимическим показателям  $v$ , выбранным по программе "Ню-2" (рис.6). На основе этой модели на принципе подобия были проведены прогноз оруденения ниже разведанных горизонтов и реконструкция интервалов оруденения, уничтоженных эрозией (рис.7).

Результаты многочисленных оценок прогнозных ресурсов с помощью показателя подобия месторождений различных геолого-промышленных и генетических типов свидетельствуют о реальности этого параметра. На ранних стадиях геологического и геохимического изучения рудопоявлений, вскрытых эрозионным срезом на уровне промышленных интервалов оруденения, к прогнозной оценке может привлекаться показатель подобия, определяемый по величине отношений между основными параметрами вторичных ореолов рассеяния оцениваемых и эталонных объектов.



Р и с. 6. Формализованная модель Лекын-Тальбейского месторождения

1 - рудное тело; 2 - первичный ореол; 3 - осредненные значения нормированных продуктивностей меди по горизонтам восьми разведочных профилей



Р и с. 7. Продольная проекция Лекын-Тальбейского месторождения с реконструкцией эродированной части и прогнозом оруденения на глубину

1 - разведанная часть рудного тела; 2 - резерв оруденения на глубину; 3 - интервал, уничтоженный эрозией; 4 - изолинии в условной метрике 0,0-1,0; 5 - современная дневная поверхность; 6 - разведочные профили и скважины

## ЛИТЕРАТУРА

1. М и л я е в С.А. Литохимические поиски полиметаллических месторождений. М.: Недра, 1988. 183 с.
2. С о л о в о в А.П. Геохимические методы поисков месторождений полезных ископаемых: Учеб. для вузов. М.: Недра, 1985. 294 с.
3. С о л о в о в А.П. Оценка прогнозных ресурсов при литохимических поисках //Геохимические и геофизические методы поисков рудных месторождений на северо-востоке СССР. Магадан: СВКНИИ, 1985. С. 47-59.
4. С о л о в о в А.П. Геохимические модели при поисках и оценке рудных месторождений //Разведка и охрана недр. 1987. № II. С. 51-54.
5. С о л о в о в А.П., М а т в е е в А.А. Геохимические методы поисков рудных месторождений: Учеб.пособие. 2-е изд. М.: Изд-во МГУ, 1985. 232 с.
6. Ч е п к а с о в а Т.В. Геохимическая зональность и оценка Лекын-Тальбейского рудного поля //Разведка и охрана недр, 1985. № 6. С. 24-27.

УДК 550.4 + 550.84

А.И.Перельман, Е.Н.Борисенко

### ГЕОХИМИЯ ГЛЕЕВЫХ ПРОЦЕССОВ

Окислительно-восстановительные условия принадлежат к важнейшим геохимическим параметрам земной коры. В связи с этим им посвящены многочисленные исследования, причем наметилась тенденция количественной характеристики данных условий по величине окислительно-восстановительного потенциала  $E_h$ . На этой основе выделяют резко окислительные, слабоокислительные, слабовосстановительные, резковосстановительные и прочие условия. Однако наши исследования установили, что для классификации восстановительных условий ведущее геохимическое значение имеет не степень восстановленности среды, определяемая  $E_h$ , а природа восстановителей [13]. В результате возникло представление о двух типах восстановительной среды в зоне гипергенеза, биосфере и осадочной оболочке в целом: сероводородной и глеевой. В геохимическом отношении они во многом противоположны друг другу, хотя величина  $E_h$  может быть одинаковой. Эти различия важно учитывать при

решении различных геохимических задач, в том числе и при геохимических поисках рудных месторождений [17]. Сероводородная среда, как правило, неблагоприятна для миграции большинства рудных элементов, образующих в ней труднорастворимые сульфиды, гидроксиды и другие соединения. Глеевая среда, напротив, благоприятна для миграции многих рудных элементов, с чем, в частности, связано формирование оторванных вторичных ореолов рассеяния месторождений, ослабление рудных аномалий вплоть до их уничтожения, а в некоторых случаях также формирование безрудных и усиление рудных аномалий (на глеевых барьерах). Геохимические процессы, протекающие в сероводородной среде, изучены достаточно хорошо, и настоящее сообщение посвящается второму типу восстановительных процессов - глеевому.

Научное понятие о глеевых процессах (оглеении) связано с именем крупного украинского почвовед и грунтоведа, ученика В.В. Докучаева - Г.Н. Висоцкого. В 1905 г. он предложил использовать украинский народный термин "глей"<sup>1</sup> для обозначения широко распространенных восстановительных процессов в почвах. В дальнейшем в течение 50 лет глеевые процессы изучались в основном в почвоведении и грунтоведении. Без использования данного термина они рассматривались в литологии в качестве "сидеритовой" и прочих фаций [15]. В 50-х годах нашими работами было показано, что глеевые процессы, аналогичные протекающим в почвах, чрезвычайно широко распространены в водоносных горизонтах осадочной толщи, что в результате этих процессов многие осадочные породы сильно изменились. Так возникло представление о глеевом эпигенезе, глеевых водах [1, 13, 14]. Выяснилось, что последние наиболее распространены в земной коре, значительно шире, чем кислородные и сероводородные. Изучение глеевых процессов оказалось необходимым для решения многих теоретических и прикладных вопросов наук о Земле - рудообразования, геохимических методов поисков полезных ископаемых, инженерной геологии, почвоведения и др.

Глеевые процессы в горных породах обусловлены глеевыми водами, которые обладают восстановительной способностью, обязанной деятельности анаэробных бактерий. Эти воды не содержат растворенного кислорода и, как правило, бедны сульфатами, практически не содержат сероводорода. Восстанавливающим агентом в них служат молекулярный водород ( $H_2$ ), углеводороды, другие органические соединения. Однако кислород необходим для деятельности анаэробных бактерий, и они получают его от различных минеральных соединений, находящихся в породах или водах - гидроксидах трехвалентного железа, четырехвалентного марганца, нитратов и т.д. В результате железо и марганец восстанавливаются до двухвалентного состояния, азот - до молекулярного или аммиака. При этом происходит также восстановление соединений пяти- и четырехвале-

---

<sup>1</sup> Сизые горизонты в почвах, на дне болот и озер.

тного ванадия, шести- и четырехвалентного селена, шестивалентного урана и других окисленных соединений. При оглеении некоторые элементы уменьшают свою миграционную способность, как например, уран, селен, ванадий, частично молибден и другие. Однако большая часть рудных элементов в глеевых водах характеризуется высокой миграционной способностью, образуя ионы или органоминеральные комплексы, хорошо растворимые в воде. В первую очередь это относится к железу и марганцу.

Таким образом, хотя глеевые и сероводородная среды являются восстановительными, в геохимическом отношении они во многом противоположны друг другу: глеевая среда благоприятна для миграции многих рудных элементов, сероводородная – неблагоприятна.

До недавнего времени вопрос о формах миграции рудных элементов в водах решался преимущественно с позиций ионной концепции и равновесной термодинамики [3,9]. На этой основе определялись ионы, характерные для отдельных элементов, оценивалась интенсивность их миграции. Однако подобный подход правилен только для вод, не содержащих растворенных органических веществ (РОВ). В глеевых же водах, как правило богатых РОВ, металлы входят в состав органических соединений и независимо от индивидуальных свойств могут мигрировать с равной интенсивностью, определяемой интенсивностью миграции РОВ. Это коренным образом меняет представления по гидрогеохимии рудных элементов в значительной части поверхностных и подземных вод, в том числе об их миграции в гидрохимических ореолах рудных месторождений гумидных ландшафтов, в первую очередь в тундре и тайге.

По степени восстановленности глеевые процессы могут быть разделены по крайней мере на два подтипа: слабogleевые и резкоogleевые. К слабogleевым мы предложили отнести воды, в которых уран может мигрировать в шестивалентном состоянии, а к резкоogleевым – воды, в которых этот элемент восстанавливается до четырехвалентного состояния и становится малоподвижным [5,8]. В резкоogleевых водах возможна миграция молибдена ( $Mo^{6+}$ ) и меди ( $Cu^{2+}$ ). Вероятно, в дальнейшем потребуется различать наиболее резкоogleевые воды, в которых молибден восстанавливается до четырехвалентного состояния, а медь – до одновалентного. В таких водах оба металла будут малоподвижными.

Глеевое выщелачивание. По щелочно-кислотным условиям оглеение можно разделить на четыре класса: сильноокислое, слабоокислое, нейтральное и слабощелочное, сильнощелочное. Со всеми этими процессами связано глеевое выщелачивание почв и пород.

Сильнокислое оглеение обусловлено водами с pH менее 3-4. Они характерны для глубинных рассолов артезианских бассейнов Русской и Сибирской платформ, Предкарпатского прогиба и других регионов. Эти воды относятся к так называемой зоне замедленного водообмена, или застойных вод. Работами Е.В.Пиннекера [6, 15], Г.А.Голевой [7] и других гидрогеохимиков установлено, что pH в таких

водах может снижаться до 2, что они нередко содержат РОВ, обогащены свинцом, цинком и другими рудными элементами. Нередко такие воды слаботермальные и представляют собой "типичные рудоносные растворы" [12]. Сильнокислое оглеение нехарактерно для вторичных ореолов рассеяния, формирующихся в ландшафтах. Поэтому с его проявлением при наземных литохимических поисках иметь дело не приходится. Напротив, при глубинных поисках, при опробовании керна скважин, продукты сильнокислого оглеения могут встретиться. Это - сильновыщелоченные, выбеленные, бескарбонатные породы с резко пониженным содержанием ряда рудных элементов. Можно предположить, что в результате сильнокислого оглеения рудные аномалии уничтожаются полностью. Породы, подвергшиеся сильнокислому оглеению, вероятно, распространены не только на больших глубинах, но и на земной поверхности как результат тектонических поднятий и эрозии. Вместе с тем свойства таких пород никто не изучал и сами породы даже не описаны.

Слабокислое оглеение обусловлено водами, имеющими рН от 3-4 до 6,5. Эти процессы особенно характерны для болот и заболоченных ландшафтов гумидного климата - тундры, тайги, широколиственных лесов, влажных тропиков, в районах распространения силикатных пород и рудных месторождений. На территориях со сплошной многолетней мерзлотой слабокислое оглеение встречается и на горных склонах. Этот процесс обязан бактериальному разложению органических веществ в почвах и илах с бескислородной средой. Образующиеся фульвокислоты реагируют с рудными элементами, давая различные растворимые органоминеральные комплексы. Это было доказано для никеля, меди, золота и других металлов [2]. И.Б.Никитина установила, что в мерзлотной адланской тайге кальций, магний, титан, марганец, ванадий, медь, никель, цинк и многие другие элементы мигрируют в органоминеральной форме. И только хлор, натрий, сера ( $SO_4^{2-}$ ) образуют свободные ионы [11].

Слабокислое глеевое выщелачивание, характерное для вторичных ореолов рассеяния заболоченных районов гумидного климата, приводит к ослаблению рудных аномалий ряда металлов, что необходимо учитывать при литохимических поисках в таких ландшафтах. Слабокислое глеевое выщелачивание развито также во многих водоносных горизонтах артезианских бассейнов. Такие воды, например, распространены в неогеновых отложениях Западно-Сибирского артезианского бассейна в районе г.Томска.

Особенно интенсивно слабокислое оглеение протекает в породах легкого механического состава, например в песках. Оно не только приводит к почти полному выносу гидроксидного железа, но и освобождает породы от нестойких алюмосиликатов. После мобилизации гидроксидов железа с поверхности минеральных частиц органические кислоты, получив доступ к незащищенным "железистой рубашкой" минералам, активно разрушают алюмосиликаты, образуя комплексы с алюминием и другими ме-

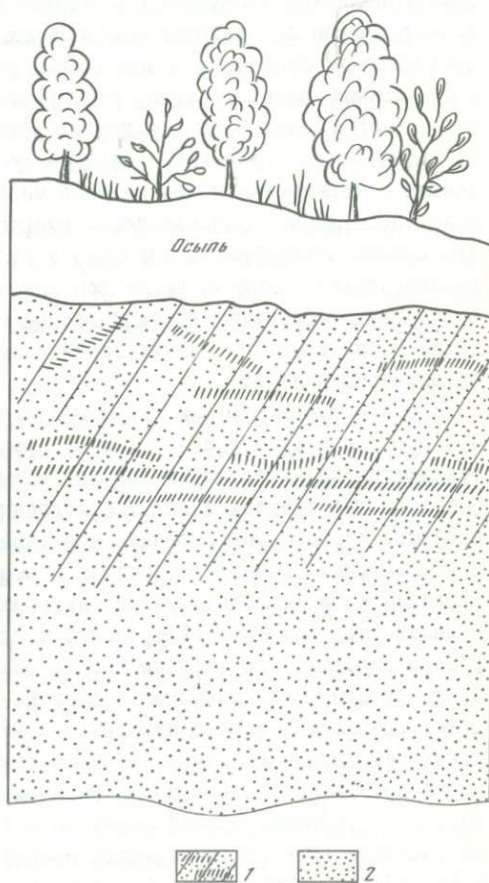
тадами. Эти комплексы легко выносятся фильтрующимися водами за пределы водоносных горизонтов. В результате кварцевые пески освобождаются от загрязняющих примесей и становятся по существу мономинеральными резковывеленными породами, особенно пригодными для стекольного производства. Таково происхождение мезозойских стекольных песков Подмосковья. Например, в одном из карьеров Люберецкого района под четвертичными отложениями малой мощности залегают пески верхневолжского возраста ( $J_3v_3$ , рис.1). Верхний горизонт песков имеет желтоватую окраску, под ним залегают снежно-белые пески, которые являлись объектом эксплуатации. С рассматриваемых позиций при осадкообразовании

Р и с. 1. Обнажение песков верхневолжского яруса ( $J_3v_3$ ) в отработанном карьере Люберецкого района Московской области

1 - светло-желтые среднезернистые кварцевые пески с тонкими полосами слабого ожелезнения; 2 - снежно-белые среднезернистые кварцевые пески (оглеенные)

пески, как и большинство осадочных песков, содержали некоторое количество гидроксидов железа, тонкой пленкой покрывавших отдельные зерна кварца и других обломочных минералов. В дальнейшем при погружении и перекрытии юрских отложений меловыми, палеогеновыми, неогеновыми и четвертичными отложениями верхневолжский горизонт стал вмещателем подземных вод, характеризующихся эвazionным режимом. Отсутствие кислорода в водах на большой глубине определяло развитие процессов оглеения и миграцию ионов железа диффузионным путем к кровле пласта.

В дальнейшем при тектонических поднятиях покров мезо-кайнозойских отложений в значительной степени был смыт и верхневолжские пески, вероятно, не раз выходили на земную поверхность. В этих условиях восстановительная среда сменялась окислительной. Железо, скопившееся в верхней части водоносного горизонта, окислялось, что и придавало вер-



хам верхневолжских песков буровато-желтую окраску. Так как нижележащие горизонты песков в ходе оглеения были полностью отмыты от пленочного железа, то при окислении их окраска не изменилась — они сохранили свой снежно-белый цвет. Спектральный анализ этих песков подтвердил их чистоту и показал почти полное отсутствие в них микроэлементов. Содержание железа не превышает 0,02%, что отвечает требованию к сырью, используемому для приготовления лучших сортов стекла. Описанные процессы и создали возможность эксплуатации песков в качестве сырья для стекольного производства.

Таким образом, стекольные пески не представляют собой особую фацию, а являются продуктом эпигенетического изменения желтоватых осадочных песков под действием подземных вод в водоносных горизонтах артезианских бассейнов с элизионным режимом. Этим намечаются поисковые признаки данного сырья, расширяются перспективы его обнаружения как в Подмосковье, так и в других регионах.

Выбеленные (оглеенные) песчаные горизонты — результат кислого оглеения — характерны и для разреза мезокайнозойских отложений Воронежской антеклизы. Протерозойские кварциты Западного Забайкалья, имеющие важное промышленное значение в связи с очень низким содержанием железа, также являются продуктом древнего оглеения, протекавшего в водоносных горизонтах до байкальской складчатости. Кислое оглеение также характерно для нижних горизонтов красноземной и латеритной коры выветривания [18].

Нейтральное и слабощелочное (карбонатное) оглеение развито в болотных почвах, сформировавшихся на карбонатных породах в гумидном климате. Оно также характерно для трещинных вод в изверженных породах, известняках и доломитах. Карбонатное оглеение еще шире распространено в болотах и заболоченных почвах лесостепей и черноземных степей. Условия для миграции металлов здесь менее благоприятны, чем при кислом оглеении. В частности, железо в нейтральной и слабощелочной среде осаждается в виде сидерита или гидроксида. Условия миграции меди, никеля, кобальта, свинца также менее благоприятны, чем при кислом оглеении. Марганец, напротив, хорошо мигрирует в этих условиях, так как рН осадения гидроксида марганца из разбавленных растворов равна 9 [13]. Содержание РОВ в подобных водах также меньше. Но все же миграция металлов в органоминеральной форме возможна. Авторами детально изучено карбонатное оглеение в пермских красноцветах Приуралья, меловых и кайнозойских красноцветах Средней Азии [1, 13, 14]. Установлено, что в результате карбонатного оглеения водоносные горизонты красноцветов (пески, трещиноватые известняки) лишились почти всего пленочного железа, породы приобретали белесый, зеленоватый, сизый цвет. Вместе с железом выщелачивались марганец, молибден, никель, свинец [1]. Средние части алевритовых и глинистых водоупорных слоев сохраняли

свою красную окраску. В результате красноцветная формация приобретает пестроцветность. В некоторых случаях типичные пестроцветы представляют собой былые красноцветы, измененные глеевыми подземными водами [14].

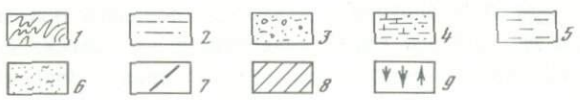
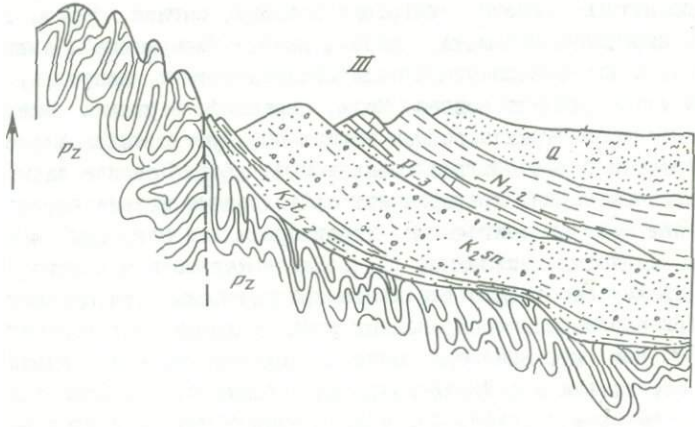
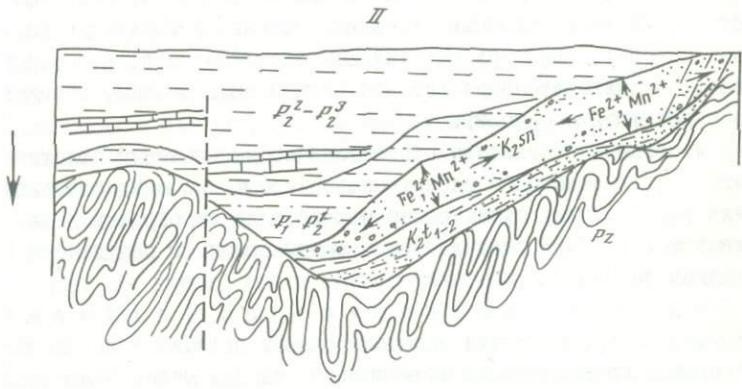
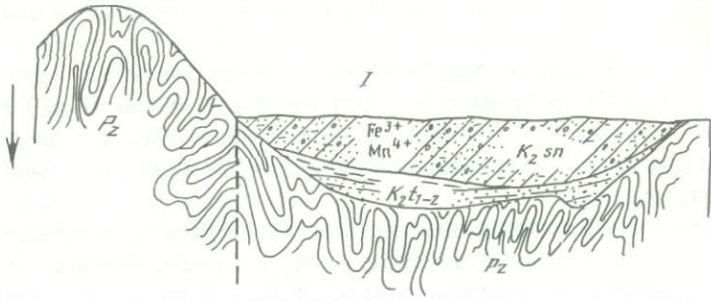
В районе предгорий хребта Каратау (Южный Казахстан) авторы наблюдали мощные толщи песчано-галечных отложений сенона ( $K_2gn$ ) белого цвета. Изучение палеогеохимии ландшафта этого района привело к выводу, что окраска пород эпигенетическая, обусловленная оглеением в элизионный этап.

Палеогеохимические данные позволяют утверждать, что ландшафты сенона относились к красноцветному типу, и континентальные отложения были представлены типичными красноцветами. Позднее эта территория испытала прогибание и перекрылась мощной толщей морских осадков палеогена. Песчано-галечные отложения сенона, погруженные на значительную глубину, являлись вмещающим подземных вод, в которых создавалась восстановительная глеевая обстановка. С этим, очевидно, и связано выбеливание (рис.2).

В неогене в результате неотектонических движений отложения сенона были вновь выведены на дневную поверхность. Но окислительная обстановка уже не могла существенно повлиять на их окраску, так как подвижное железо было вынесено за пределы толщи. В результате породы остались выбеленными.

Содовое (сильнощелочное) оглеение обусловлено сильнощелочными бескислородными водами. Условия для миграции многих катионогенных элементов в них еще менее благоприятны, чем при карбонатном оглеении. Миграция кальция, магния, бария, стронция, железа, марганца, кобальта, никеля, свинца "запрещена". Анионогенные элементы, а также элементы-комплексобразователи, напротив, в ряде случаев мигрируют интенсивно. Медь, цирконий, бериллий, скандий, иттрий и иттриевая группа редких земель образуют в содовых глеевых водах растворимые карбонатные комплексы [13,14]. Под влиянием содовых вод осадочные породы претерпевают существенные изменения, которые были названы содовым эпигенезом, характерным для некоторых месторождений типа медистых песчаников [13]. Закономерности содового глеевого выщелачивания необходимо учитывать при глубинных геохимических поисках — при опробовании современных и былых водоносных горизонтов. При поверхностных литохимических поисках содовое глеевое выщелачивание может встретиться в районах развития содовых болот. Последние известны на Витимском плоскогорье, в Восточной Африке и других регионах.

Глеевые барьеры. Эти барьеры возникают в основном при встрече кислородных вод с глеевой средой. В зависимости от состава кислородных вод можно установить четыре вида глеевых барьеров, обозначаемых символом С: на контакте глеевой среды с сильнокислыми водами возникает барьер С1, на ее контакте со слабокислыми водами — С2, на контакте



Р и с 2. Историческая геохимия отложений сенона Каратау (Южный Казахстан)

а - эпоха накопления красноцветных отложений сенона -  $K_2Sn$ ; б - эпоха прогибания, перекрытия сеноновских отложений (элизонный этап развития артезианского бассейна -  $K_2-N_1$ ); в - современный этап (неотектонический) -  $N_2 - Q$ ; I - метаморфические породы палеозоя; 2 - красноцветные глинистые отложения турона ( $K_2t_{1-2}$ ); 3 - песчано-галечные отложения сенона ( $K_2Sn$ ); 4 - морские отложения палеогена ( $P_1-T_3$ ); 5 - континентальные песчано-глинистые красноцветы неогена (N); 6 - четвертичные отложения; 7 - разломы; 8 - красноцветность отложений; 9 - направление тектонических движений

с нейтральными и слабощелочными водами - С3 и на контакте с сильнощелочными, содовыми водами - С4.

На барьерах С1 и С2 активно осаждаются уран, молибден, медь; на барьерах С3, помимо этих элементов, осаждаются также хром, рений, селен, ванадий; на барьере С4 возможно образование аномалий серебра и мышьяка.

Глеевые барьеры характерны для нижних частей склонов и долин в тех местах, где в верхних частях склонов формируются кислородные воды. Эти барьеры могут формироваться и в ландшафтах рудных месторождений, в которых с ними связаны формирование безрудных аномалий и усиление рудных. Так как глеевая среда может быть слабоглеевой (слабовосстановительной) и резкоглеевой (резковосстановительной), то возможно существование глеевых барьеров на контакте слабоглеевых вод с резкоглеевой средой.

Соответственно возможны аномалии на глеевых барьерах вида С5 (из сильноокислых глеевых вод), С6 (из слабоокислых вод), С7 (из нейтральных и слабощелочных вод) и С8 (из содовых вод). На глеевых барьерах типа С5, С6 возможно формирование аномалий меди, урана и молибдена, на барьерах С7, С8 - урана и молибдена.

Наиболее изучены аномалии С2 и С6. Так, например, если на склонах в ландшафтах гумидного климата окисляются медные руды, то трещинно-грунтовые кислородные воды, дренирующие такие месторождения, будут обогащены медью. Попадая в депрессии рельефа, где развиты болота с глеевой средой, на контакте с ней возникает глеевый барьер С2. С ним связано осаждение меди в виде труднорастворимых соединений одновалентной меди или в виде самородной меди. Последняя давно уже обнаружена в болотах Урала. Г.С.Макунина изучила аномалии на глеевом барьере С2 в ландшафтах зеленокаменной полосы на Среднем Урале. В глеевых горизонтах древней коры выветривания здесь повышено содержание меди, выщелоченной из верхних горизонтов коры с окислительной обстановкой [10].

По такому же типу возможно образование аномалий на глеевых барьерах в ландшафтах, где распространены нейтральные, слабощелочные и содовые воды. Аномалии типа С7 были изучены С.И.Сотниковой в болотах Мугоджар [4]. На таких барьерах возможны аккумуляция молибдена

и формирование его безрудных аномалий (а в районах молибденовых месторождений и усиление рудных). Детально изучены урановые аномалии С6 на глеевых барьерах таежной зоны [8].

Теоретический и практический интерес представляет рудообразование на глеевых барьерах. Оно установлено для урана в месторождениях гидрогенного типа [5]. Вероятны концентрации этого типа и для других металлов, в частности золота.

Итак, глеевые процессы широко распространены в земной коре. Они характерны как для ландшафтов, так и для глубоких горизонтов литосферы. С ними связаны рудообразование, формирование безрудных аномалий и усиление рудных, уничтожение аномалий. Поэтому данные процессы необходимо учитывать при геохимических поисках рудных месторождений по вторичным ореолам рассеяния, при прогнозировании рудных месторождений, при решении задач инженерной геологии и гидрогеологии.

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Б о р и с е н к о Е.Н. Геохимия глеевого катагенеза в породах красноцветной формации. М.: Наука, 1980. 164 с.
2. Б у г е л ь с к и й Ю.Ю. Рудоносные коры выветривания влажных тропиков. М.: Наука, 1979. 286 с.
3. Г а р р е л с Р., К р а й с т Ч. Растворы, минералы, равновесия. М.: Мир, 1968. 368 с.
4. Геохимия ландшафтов рудных провинций. М.: Наука, 1982. 261 с.
5. Гидрогенные месторождения урана. М.: Атомиздат, 1980. 272 с.
6. Гидрогеохимия: Основы гидрогеологии. Новосибирск: Наука, 1982. 286 с.
7. Г о л е в а Г.А. Гидрогеохимия рудных элементов. М.: Недра, 1977. 216 с.
8. Е в с е е в а Л.С., П е р е л ь м а н А.И., И в а н о в К.Е. Геохимия урана в зоне гипергенеза. 2-е изд. М.: Атомиздат, 1974. 280 с.
9. К р а й н о в С.Р. Геохимия редких элементов в подземных водах. М.: Недра, 1973. 296 с.
10. М а к у н и н а Г.С. Геохимические особенности ландшафтов Кабанской зеленокаменной полосы Среднего Урала в связи с поисками медноколчеданных месторождений: Автореф. дисс. канд. геогр. наук. М.: 1974. 20 с.
11. Н и к и т и н а И.Б. Геохимия ультрапресных вод мерзлотных ландшафтов. М.: Наука, 1977. 144 с.
12. П а в л о в Д.И. Экзогенные хлоридные воды и эндогенное рудообразование. М.: Недра, 1975. 100 с.

13. П е р е л ь м а н А.И. Геохимия эпигенетических процессов (зона гипергенеза). М.: Недра, 1968. 332 с.
14. П е р е л ь м а н А.И. Геохимия. М.: Высш.шк., 1979. 423 с.
15. П и н н е к е р Е.В. Рассолы Ангаро-Ленского артезианского бассейна. М.: Наука, 1966. 332 с.
16. П у с т о в а л о в Л.В. Петрография осадочных пород. М.: Гостоптехиздат, 1940. Т.1. 476 с.; Т.2. 420 с.
17. С о л о в о в А.П. Геохимические методы поисков месторождений полезных ископаемых: Учеб. для вузов. М.: Недра, 1985. 294 с.
18. Ф а г е л е р П. Основы учения о почвах субтропических и тропических стран. М.: Сельхозгиз, 1935. 168 с.
19. Щ е р б и н а В.В. Основы геохимии. М.: Недра, 1972. 296 с.

УДК 550.41

Е.М.Квятковский

### СПОСОБЫ ОЦЕНКИ МИРОВЫХ ПРОГНОЗНЫХ РЕСУРСОВ

Особое значение при количественном прогнозировании имеет оценка вероятного соотношения запасов, приходящихся на долю месторождений различных классов крупности, коль скоро промышленно наиболее ценными являются крупные месторождения. По чисто статистическим данным В.И.Красниковым [6] получено в среднем для десяти элементов соотношение числа крупных, средних и мелких месторождений, равное 1:3,3:10. В силу тех или иных соображений по мнению различных исследователей, это соотношение должно быть несколько иным: по Н.И.Сафронову [12] - 1:4:16; по А.П.Соловову [14] - 1:7:49; по Г.А.Булкину [1] - 1:9:90. Указанная зависимость по [2,3] может быть экстраполирована в сторону более мелких месторождений сколь угодно далеко. Зная максимальные запасы  $q_{\max}$  и число таких месторождений  $N_0$  в земной коре, можно подсчитать суммарные запасы  $Q_i$  и количество месторождений  $N_i$  в более мелких классах:

$$Q_i = q_{\max} N_0 (k/10)^i, \quad (1)$$

$$N_i = N_0 k^i. \quad (2)$$

Такое распределение аналогично распределению Парето, широко применяемому в практике экономических исследований, и его характерной особенностью является монотонные изменения  $N_i$  и  $Q_i$  на всем интервале от  $q_{\max}$  до  $q_{\min}$ . В частном случае при  $k = 10$

$$Q_i = q_{\max} N_0 = \text{const}, \quad (3)$$

т.е. запасы во всех классах месторождений одинаковы. К такой модели склоняется и А.П.Соловов [14], рассматривая так называемые геохимические запасы месторождений в контуре  $S_a$ .

Подобная зависимость лежит в основе метода оценки прогнозных запасов, рассмотренного Г.А.Булкиным [1]. Распределение запасов в ранжированном ряду месторождений, по его мнению, подчинено гиперболическому закону, или закону Ципфа:

$$q_N = q_{\max}/N, \quad (4)$$

где  $N$  - номер месторождения в ранжированном ряду;  $q_{\max}$  - запасы самого крупного месторождения в ряду, тогда

$$q_N N = q_{\max} = \text{const}. \quad (5)$$

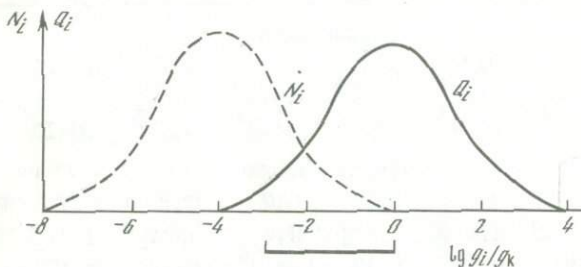
Пропусков в ранжированном ряду быть не должно, а резкие отклонения от равенства (5) свидетельствуют о пропуске месторождений в том или ином классе. Сходный способ оценки "пропущенных" в данном регионе месторождений предлагается Н.И.Сафроновым [13], где не ставится условие (5), а сопоставляется эмпирическая кривая с аппроксимирующей гиперболической, проведенной по максимальным значениям  $Q_i$ . Разность между кривыми трактуется как "пропущенные" запасы месторождений. Основным недостатком рассматриваемых методик является неопределенность в оценке  $q_{\max}$  (или  $Q_{\max}$ ), которые принимаются за исходные при определении возможных запасов "пропущенных" месторождений. Приведенная в [1] эмпирическая зависимость

$$q_{\max} = 10^{10,5} \cdot C_k^{0,85} \quad (6)$$

не снимает эту неопределенность, поскольку нет оснований считать, что крупнейшие месторождения всех элементов уже обнаружены. Нельзя также утверждать, что  $Q_{\max}$  (максимальные суммарные запасы в классе  $i$ ) действительно являются предельно возможными и дальнейшие поисково-разведочные работы не приведут к обнаружению новых месторождений класса  $i$  или  $(i + 1)$ .

Однако возможно и другое предположение - распределение суммарных запасов в различных классах крупности месторождений может быть аппроксимировано логарифмически нормальным законом по аналогии с распределением самородков золота различной крупности или проб с разным содержанием в рудном теле, на что в свое время обращал внимание Н.К.Разумовский [10]. Логнормальное распределение линейных размеров рудных жил и метасоматических залежей со степенью изменчивости  $\epsilon$  от 1,2 до 6,4 (в среднем  $\epsilon = 3$ ) было установлено Л.Н.Овчинниковым [8] при статистической обработке данных по 700 месторождениям девяти элементов (урана, молибдена, вольфрама, олова, свинца и цинка, меди, золота и фтора). При логнормальном распределении запасов месторождений каждого элемента по классам должен быть класс, в котором сосредоточены максимальные запасы, а слева от него - класс с максимальным числом месторождений (рудопоявлений); при этом различие между классами возрастает с ростом дисперсии распределения (рис.1). Наблюдаемые эмпи-

рические закономерности относятся к интервалу между двумя максимумами. Можно предполагать, что для получения правой части кривой  $Q_i$  недостаточно статистического материала, а для получения левой ветви кривой  $N_i$  недостаточна детальность исследований мелких месторождений и рудопроявлений на значительных площадях.



Р и с.1. Зависимость числа месторождений  $N_i$  различных классов крупности  $q$  их суммарных запасов  $Q_i$

Жирная линия — наблюдаемый интервал

При логнормальной модели распределения "крупные месторождения" относятся к классу, суммарные запасы которого максимальны. Именно это и предопределяет ведущую роль месторождений этого класса в горнодобывающей промышленности. В первом приближении запасы крупного месторождения, как отмечалось ранее [4], могут быть оценены по зависимости

$$q_{кр} = 4 \cdot 10^8 c_k, \text{ т.} \quad (7)$$

Если считать, что глобальные прогнозные ресурсы любого элемента в первом приближении могут быть до глубины 1 км приняты равными [4]:

$$Q_{\Sigma} = 5 \cdot 10^{12} c_k, \text{ т,} \quad (8)$$

то, используя логнормальную или гиперболическую модели распределения, можно рассчитать среднее число месторождений различных классов, приходящихся на  $10^6 \text{ км}^2$  суши.

При расчетах принята десятичная классификация месторождений в диапазоне семи классов, по три класса в обе стороны от класса крупных месторождений. Расширяя классификацию В.И.Красникова [6], будем именовать последовательно классы следующим образом [4]: феноменальные (ф), суперуникальные (с.у.), уникальные (у), крупные (к), средние (с), мелкие (м), рудопроявления (п). Результаты расчета, приведенные в табл.1, относятся к одному элементу.

В настоящее время используются 72 химических элемента, включая 13 редкоземельных. Если считать, что руды каждого месторождения комплексные, т.е. содержат в промышленных концентрациях в среднем 5-6 элементов, то число месторождений на материках до глубины 1 км должно

Т а б л и ц а 1

Модели распределения глобальных ресурсов числа и плотности месторождений одного элемента на материках до глубины 1 км

Параметры моделей	Класс месторождений							
	п	м	с	к	у	с.у.	ф	Σ
Логнормальная								
$Q_1/c_k \cdot 10^{12}$	0,08	0,32	1,2	2	1,2	0,32	0,08	5
$N_1$	$2 \cdot 10^5$	$8 \cdot 10^4$	$3 \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^3$	$3 \cdot 10^3$	8	0,2	$3,15 \cdot 10^5$
$S_1, \text{км}^2$	$8 \cdot 10^2$	$2 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^3$	$3 \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^5$	$20 \cdot 10^6$	-	-
Гиперболическая								
$Q_1/c_k \cdot 10^{12}$	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	5
$N_1$	$1,8 \cdot 10^6$	$1,8 \cdot 10^5$	$1,8 \cdot 10^4$	$1,8 \cdot 10^3$	$1,8 \cdot 10^2$	$1,8 \cdot 10$	1,7	$2 \cdot 10^6$
$S_1, \text{км}^2$	$8 \cdot 10$	$8 \cdot 10^2$	$8 \cdot 10^3$	$8 \cdot 10^4$	$8 \cdot 10^5$	$8 \cdot 10^6$	-	-

быть в 10-12 раз больше, чем в табл.1. Среди них, однако, не более 30% относится к выходящим на уровень эрозийного среза, а остальные 70% - к-слепым, весьма труднодоступным при современной методике поисков. При этих условиях на  $10^6 \text{км}^2$  должны проявиться в среднем от  $6 \cdot 10^3$  до  $4 \cdot 10^4$  месторождений и рудопроявлений в зависимости от принятой модели распределения, что в общем хорошо согласуется со среднестатистическими данными для многих рудных районов:  $10^4$  "рудных выходов" на  $10^6 \text{км}^2$  по данным М.Алле [4]. Или при этих же условиях одно крупное месторождение приходится в среднем на  $10^4 \text{км}^2$ .

Рассмотренные закономерности могут быть использованы при оценке априорных ресурсов рудных провинций и зон вне категорий на стадии региональных исследований от 1:1 000 000 до 1:200 000 масштаба площади в сотни тысяч-миллионы квадратных километров. Прогнозные оценки должны относиться к месторождениям той или иной рудной формации, адекватной геологическому строению и металлогении территории.

При оценке прогнозных ресурсов широкого круга элементов, существенно различающихся по способности к концентрированию, следует при расчете запасов крупного месторождения и глобальных запасов использовать формулы второго приближения [5]:

$$q_{кр} = 4 \cdot 10^{(3+10a)} c_k \quad (9)$$

$$Q_{\Sigma} = 5 \cdot 10^{(10,5+3a)} c_k \quad (10)$$

где  $a$  - удельный логарифмический кларк концентрации [4]. По указанным параметрам с учетом логнормальной или гиперболической модели распределения можно рассчитать число и суммарные запасы месторождений различной крупности. Как известно, по результатам поисковых литохимических съемок масштаба 1:200 000-1:50 000 по потокам рассеяния, а затем поисково-оценочных литохимических съемок масштаба 1:25 000-1:10 000 по вторичным ореолам рассеяния можно оценить прогнозные ресурсы исследуемой территории соответственно по категориям  $P_2$  и  $P_1$ .

Во всех трех случаях полученные при расчетах значения включают в себя общие геохимические прогнозные ресурсы ( $P_3, P_2, P_1$ ), т.е. все количество металла с надфоновыми содержаниями в объеме положительных геохимических аномалий соответствующего ранга. Разность же между оценками ресурсов в соседних категориях  $P_3 - P_2; P_2 - P_1; P_1 - (A+B+C)$  или через категорию  $P_3 - P_1; P_3 - (A+B+C); P_2 - (A+B+C)$  будем именовать остаточными геохимическими прогнозными ресурсами. Как правило, стандартный множитель прогнозных ресурсов соседних категорий не должен превышать трехкратного ( $\varepsilon \leq 3$ ). Большие расхождения могут свидетельствовать либо о неполной изученности территорий, в том числе без должного учета ее геологического строения, либо о наличии грубых ошибок в оценке кларков химических элементов для тех или иных площадей.

Для перехода от общих геохимических к промышленным прогнозным ресурсам следует ввести поправочный множитель  $\alpha$ , значение которого в первую очередь зависит от генетического типа руд и принятого при подсчете бортового содержания. Если в первом приближении считать, что распределение содержаний элемента в рудах аппроксимируется логнормальным законом с параметрами  $S$  и  $\varepsilon$ , которые для данного генетического типа месторождения сохраняются постоянными независимо от класса крупности месторождения, что следует из принципа геохимического и геометрического подобия, то для данного типа месторождений

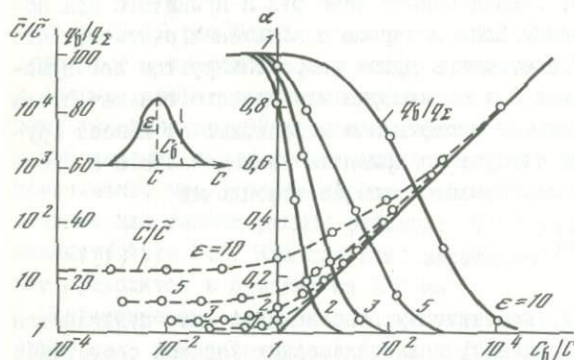
$$\alpha = q_0 / q_{\Sigma} = R_i^{\text{пром}} / R_i^{\text{геол}} = \text{const.} \quad (II)$$

При условии  $S_0 \leq S$ , что, по-видимому, справедливо для большинства промышленных типов месторождений, доля балансовых запасов составляет более 80%, или  $\alpha \geq 0,8$ , при  $\varepsilon \geq 2$  (рис.2). Иная картина будет при условии  $S_0 \gg S$ . В этом случае  $\alpha$  падает до 0,1 и меньше, в связи с чем уникальные и крупные месторождения по геохимическим запасам могут быть отнесены к мелким по запасам в богатых рудах. Хотя число таких месторождений среди огромного количества действительно мелких по геохимическим запасам, по-видимому, сравнительно невелико, в общем плане можно говорить об увеличении доли забалансовых руд среди выявленных мелких месторождений по сравнению с крупными. В настоящее время трудно решить этот вопрос, так как отсутствует необходимый статистический материал по распределению содержаний элементов в рудах и первичных ореолах месторождений различных генетических типов.

По мнению А.П.Соловова [3, I4], доля забалансовых запасов от геохимических в крупных, средних и мелких месторождениях соответственно составляет 0,1; 0,3; 0,5. В "Инструкции" [3] при рассмотрении первичных ореолов приводятся значения  $\alpha$  для семи различных генетических типов месторождений, причем считается, что  $\alpha$  не зависит от крупности месторождения.

Скарново-шеелитовый (W) .....	0,5
Скарново-полиметаллический (Pb) .....	0,3
Колчеданно-полиметаллический (Zn) .....	0,3
Медно-молибденовый (Cu, Mo) .....	0,8; 0,6
Жильный полиметаллический (Pb) .....	0,2
Жильный золото кварцевый (Au) .....	0,3
Прожилково-вкрапленный настурансульфидный (U) .....	0,4
Жильный золото-серебряный (Au) .....	0,3

Скорее всего, величина  $\alpha$  зависит главным образом от генетического типа месторождения, принятых значений  $C_0$  и в какой-то мере от масштаба месторождения, однако данных для надежной оценки  $\alpha$  с учетом всех этих факторов пока явно недостаточно.



Р и с . 2. Относительные балансовые запасы  $q_0/q_2$  и средние содержания элемента в рудах  $C_0/C$  в зависимости от бортового содержания  $C_0/C$  и параметра  $\epsilon$

Предложено еще несколько способов оценки прогнозных ресурсов рудных районов и металлогенических зон по категории  $P_3$  среди которых следует отметить три способа: аналогий [9] через коэф-

фициент накопления [7] и через запасы наибольших месторождений ( $q_{max}$ ) [2]. Способ аналогий заключается в оценке продуктивности (металлоносности) хорошо изученных, принимаемых за эталон территорий и перенесении этих данных на исследуемые территории со сходным геологическим строением. Продуктивность (металлоносность) "эталонной" территории (металлогенических зон, рудных районов, узлов) оценивается по формуле

$$m_{\text{э}} = M_{\text{э}} / S_{\text{э}}, \quad (12)$$

где  $M_{\text{э}}$  - суммарные запасы известных и отработанных месторождений на "эталонной" территории;  $S_{\text{э}}$  - площадь "эталонной" территории. Прогнозные промышленные ресурсы ( $M_{\text{х}}$ ) оцениваемой территории определяются простым расчетом:

$$M_{\text{х}} = m_{\text{э}} S_{\text{х}}. \quad (13)$$

По данным [9], удельная продуктивность медноколчеданных рудных зон и районов Урала достаточно устойчива, со стандартным относительным разбросом в пределах  $\pm 10-15\%$ .

Способ оценки прогнозных ресурсов через коэффициент накопления:  $(K_N = Q_{\text{конц}} / Q_{\text{расс}})$  в принципе мало отличается от рассмотренного выше "кларковского" способа, коль скоро оба способа базируются на одной и той же корреляционной зависимости  $Q_{\Sigma} = K C_k$  в континентальной земной коре. Авторы [7], однако, распространяют этот способ на локальные участки земной коры, вплоть до оценки потенциальных ресурсов отдельных интрузий. Естественно, что при этом значения  $K_N$  становятся все менее и менее надежными, а способ их оценки весьма сомнительным. При расчете  $K_N$  для материковой земной коры в целом авторы без особых раздумий приняли мощность коры равной 40 км, тогда как запасы всех известных месторождений могут быть отнесены к верхней части коры мощностью не более одного-двух километров. Отсюда средние значения  $K_N = 2,8 \cdot 10^{-7}$  (от  $0,1 \cdot 10^{-7}$  для титана до  $18,4 \cdot 10^{-7}$  для хрома) оказались, естественно, заниженными в 20-30 раз, как и для отдельных рудных регионов (от  $0,9 \cdot 10^{-6}$  для Кавказа до  $2,4 \cdot 10^{-6}$  для Средней Азии). Следует также отметить, что при расчете  $K_N$  принимались во внимание лишь промышленные запасы, а не геохимические, и не вводились никакие поправки на различную способность элементов к концентрации в месторождениях.

Для отдельных рудоносных блоков площадью  $n \cdot 100 \text{ км}^2$  значения  $K_N$  укладываются в интервал величин  $(0,3-4) \cdot 10^{-4}$  для различных элементов и, принимая сравнительно хорошо изученные блоки за эталонные (с максимальным значением  $K_N$ ), можно по ним оценить слабоизученные блоки. "Перспективы блоков с низкими значениями  $K_N$  в отношении выявления крупного промышленного оруденения достаточно велики. Тем самым при условии полного учета запасов полезных ископаемых в однотипных рудоносных структурах интервал колебания  $K_N$  соответствующего элемента будет сведен к минимуму и станет характеризоваться определенной устойчивой величиной" [7, с. 73].

Значения  $K_N$  ряда элементов (W, Mo, Sn) для некоторых рудоносных плутонов колеблются в интервале  $(0,8-1,8) \cdot 10^{-2}$ , и их рекомендуется использовать для оценки прогнозных ресурсов, связанных с аналогичными плутонами. Сложность вопроса, однако, заключается в разбраковке плутонов на потенциально рудоносные и безрудные. Надежных критериев решения этого вопроса нет, именно это и количественные оценки прогнозных ресурсов через  $K_N$  делает весьма ненадежными.

Способ оценки прогнозных ресурсов [7] через запасы наибольшего месторождения ( $q_{\text{max}}$ ) основан на полученных путем обработки статистических данных по 140 рудным провинциям уравнений регрессий вида

$$\ln Q = \alpha \ln q_{\text{max}} + \beta \quad (15)$$

для семи металлов. Способ явно несостоятельный. Уравнения регрессии, опирающиеся на сравнительно ограниченный фактический материал, не имеют смыслового обоснования. Более того, при определенных соотношениях  $\ln q_{\max}$  и коэффициентов  $\alpha$  и  $\beta$  расчетные суммарные запасы  $Q$  могут оказаться меньше  $q_{\max}$ , что противоречит логике.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Булкин Г.А. Предварительная оценка мировых запасов металлов - сравнение ее способов. // Докл. АН СССР. 1982. Т.264, № 5. С. 1181-1185.
2. Булкин Г.А. Количественная оценка прогнозных запасов руд. М.: Недра, 1984. 128 с.
3. Инструкция по геохимическим методам поисков рудных месторождений. М.: Недра, 1983. 191 с.
4. Квятковский Е.М. Литохимические методы поисков эндогенных рудных месторождений. Л.: Недра, 1977. 189 с.
5. Квятковский Е.М. Количественные соотношения различных видов и форм нахождения химических элементов в литосфере. Ст. II. // Изв. вузов. Геология и разведка. 1984. № 9. С. 37-52.
6. Красников В.И. Рациональные поиски рудных месторождений. М.: Недра, 1965. 412 с.
7. Методы количественного прогнозирования ресурсов редких металлов / В.В. Иванов, С.М. Бескин, В.Н. Бондаренко и др. М.: Недра, 1985. 224 с.
8. Овчинников Л.Н. Плутоногенные гидротермальные месторождения // Генезис эндогенных рудных месторождений. М.: Недра, 1968. С. 443-489.
9. Прогнозно-поисковые комплексы. Вып. I. Комплексирование работ по прогнозу и поискам скрытых месторождений / Под ред. А.И. Кривцова. М.: ЦНИГРИ, 1983. Вып. I. 54 с.
10. Разумовский Н.К. О значении логарифмически-нормального закона распределения частот в петрографии и геохимии // Докл. АН СССР. 1941. Т. 33, № 1. С. 48-49.
11. Рундквист Д.В., Нежинский И.А. Количественное прогнозирование и некоторые вопросы теории металлогении // Разведка и охрана недр. 1984. № 7. С. 18-29.
12. Сафронов Н.И. Основы геохимических методов поисков рудных месторождений. Л.: Недра, 1971. 216 с.
13. Сафронов Н.И., Мещеряков С.С., Иванов Н.П. Энергия рудообразования и поиски полезных ископаемых. Л.: Недра, 1978. 215 с.
14. Соловов А.П. Геохимические методы поисков месторождений полезных ископаемых: Учеб. для вузов. М.: Недра, 1985. 294 с.

ЗОНАЛЬНОСТЬ ПЕРВИЧНЫХ ГЕОХИМИЧЕСКИХ ОРЕОЛОВ –  
ОСНОВА ОЦЕНКИ РУДОПРОЯВЛЕНИЙ

Одним из важнейших достижений в области прикладной геохимии за последнее время является детальное изучение первичных геохимических ореолов, окружающих рудные месторождения различных групп, типов и классов, независимо от их происхождения, возраста и геологических условий локализации [1].

Первичные геохимические ореолы, как известно, представляют собой образования, генетически единые с рудными телами; по размерам они во много раз превосходят рудные тела и содержат значительные количества промышленно ценных компонентов, иногда превышающие запасы рудных тел.

Наиболее важной особенностью первичных ореолов является их геохимическая зональность. В настоящее время наиболее детально изучена геохимическая зональность первичных ореолов гидротермальных месторождений, которая наиболее контрастна в направлении движения рудоносных растворов и обусловлена дифференциацией в распределении элементов вдоль оси этого движения. Для рудных тел крутого падения эта зональность является вертикальной с преимущественным накоплением одних ассоциаций элементов в головных частях ореолов, а других – в тыловых.

Практическое значение зональности первичных геохимических ореолов определяется тем, что она позволяет уверенно оценить уровень пересечения ореолов (в частном случае его эрозионного среза) относительно положения рудного тела и предсказать не только наличие скрытого оруденения, но и глубину его возможного нахождения и даже вероятные его масштабы.

Ретроспективный взгляд в историю развития геохимических работ позволяет отметить определенную "методологическую узость" изучения первичных ореолов, обусловленную прежде всего стремлением исследователей ускорить разработку и внедрение в производство геологоразведочных работ весьма эффективной методики поисков слепого и слабоэродированного оруденения по его первичным ореолам. Обобщение результатов изучения состава и строения первичных геохимических ореолов различных по составу и условиям формирования месторождений показывает, что в настоящее время значение первичных ореолов не может быть ограничено одними лишь поисковыми аспектами. Сейчас очевидно и большое геолого-генетическое значение первичных ореолов.

В связи с отмеченным представляется уместным рассмотреть понятия "рудное месторождение". Опыт изучения первичных ореолов рудных месторождений показывает, что месторождение представляет собой не простую сумму рудных тел, а всегда их обязательное сочетание с окружаю-

щим первичным геохимическим ореолом. Общие запасы металлов в рудных месторождениях, таким образом, складываются из запасов ореолов и запасов рудных тел. Запасы в контурах промышленных рудных тел, в отличие от общих запасов, можно назвать концентрированными.

Рудное тело и его первичный ореол – пространственно и генетически единое целое, граница между ними определяется экономическими факторами и является, таким образом, "плавающей". Вероятно, по этой причине А.П.Соловов [4] рудные тела и окаймляющие их геохимические аномалии в рудовмещающих породах постоянно объединяет в "коренное оруденение", справедливо подчеркивая тем самым единство рудных тел и ореолов и условный характер границ между ними.

Соотношение между запасами химических элементов в ореолах и рудных телах колеблется в зависимости от морфоструктурного типа месторождения, но в большинстве генетических типов месторождений запасы в ореолах преобладают, часто значительно.

Напомним определение рудного месторождения, данное в геологическом словаре: "Скопление полезного ископаемого, представленного рудой какого-либо металла или минерала". Там же отмечается, что "понятие руды меняется в результате прогресса техники", т.е. руда является категорией субъективной и, будучи основой понятия "месторождение", обуславливает субъективный характер и этого понятия. В отличие от этого включение первичных ореолов в понятие "месторождение" обеспечит последнему объективный характер, поскольку параметры первичных ореолов (периферийные части месторождения) в отличие от руд имеют объективный характер и от экономической конъюнктуры не зависят (в отличие от границ рудных тел, определенных промышленными кондициями).

Реализация предложения о признании первичных геохимических ореолов составной частью месторождения, как нам представляется, означает, что закономерности состава и строения первичных ореолов могут быть использованы для решения не только поисковых (поиски слепого оруденения), но и других задач, и в частности генетических. Особенности первичных ореолов (неотъемлемой и существенной составной части месторождения) отражают механизм формирования месторождений и поэтому могут быть использованы при генетических построениях. При этом приобретают особое значение разработка новых и постоянное совершенствование известных методов изучения месторождения.

Рассмотрим некоторые вопросы изучения зональности – наиболее примечательной особенности рудных месторождений.

Наиболее важной отличительной особенностью предлагаемой для обсуждения методики геохимического изучения рудных месторождений (здесь и далее месторождения мы будем понимать в контурах первичных ореолов) должно быть более широкое понимание первичных ореолов. Имеется в виду включение в это понятие не только ореолов микрокомпонентов (традиционных при изучении первичных ореолов), но и макрокомпонентов, т.е.

околорудных метасоматически измененных пород. При этом изучение околорудных ореолов целесообразно выполнять как строго геохимически (по результатам анализа проб на определенные элементы), так и с привлечением различных минералого-геохимических методов. Использование при изучении околорудных ореолов более широкого круга методических приемов будет способствовать более детальному изучению околорудных ореолов и установлению более выдержанных и контрастных закономерностей их состава и строения.

Одним из эффективнейших способов повышения контрастности зональности первичных ореолов, как известно, является метод расчета мультипликативных коэффициентов, элементы числителя и знаменателя в которых выбираются на основе рядов зональности элементов-индикаторов [1]. Опубликованные нами ряды зонального отложения элементов [1] включают ограниченный набор химических элементов (немногим более 20), поэтому для более полного исследования зональности выявилась очевидная необходимость резкого расширения круга исследуемых элементов. Это требует привлечения более чувствительных (по сравнению с широко применяемым при изучении первичных ореолов спектральным анализом) методов анализа геохимических проб с целью фиксации и оконтуривания первичных ореолов элементов, порог обнаружения спектрального анализа на которые недостаточен.

Совместное использование геохимической (распределение микрокомпонентов) и метасоматической (распределение макрокомпонентов) зональности также позволяет существенно повысить контрастность и, следовательно, надежность практического применения критерия зональности. Для иллюстрации этого положения в табл. I приведены величины коэффициентов геохимической зональности околорудных ореолов вокруг рудной зоны "Чемпион" золоторудного месторождения Колар (Индия). Как следует из данных табл. I, совместное использование микро- и макрокомпонентов позволяет выявить в строении околорудных ореолов весьма контрастную геохимическую зональность.

Т а б л и ц а I

Величины индикаторных отношений

Горизонты опробования	$\frac{\text{Cu}^2\text{Pb}}{\text{Ni}\cdot\text{Co}\cdot\text{As}}$	$\frac{\text{Na}_2\text{O}}{\text{K}_2\text{O}}$	$\frac{\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{Cu}^2\cdot\text{Pb}}{\text{K}_2\text{O}\cdot\text{Ni}\cdot\text{Co}\cdot\text{As}}$
25	2,205	66,0	145,53
55	0,366	1,40	0,513
70	0,060	1,57	0,094
82	0,009	1,16	0,012
Коэффициент контрастности	230	56,8	12127

В рассмотренном примере зональность метасоматических околорудных ореолов была выражена через отношения концентраций щелочных металлов в пробах. Учитывая, что в данном случае геохимическая зональность ореолов околорудного изменения вмещающих пород является отражением минеральной зональности, для усиления зональности околорудных ореолов с таким же успехом могут быть использованы и результаты изучения минералогических ореолов.

Б качестве примера, иллюстрирующего возможность комбинированного использования минеральной и геохимической зональности, в табл.2 приведены величины различных коэффициентов зональности, рассчитанных по результатам минералогических анализов проб, выполненных в минералогической лаборатории ИОМГЭ ИМПРЭ. Пробы отобраны на Арсеньевском оловорудном месторождении (Приморье). В табл.2 приведены результаты исследования проб (минералогических и геохимических), отобранных из зоны "Южной". Расчет показателя зональности основных рудных минералов показал, что галенит, сфалерит и халькопирит в повышенных количествах характерен для более высоких горизонтов исследованной зоны. В отличие от этого такие ведущие рудные минералы, как касситерит, пирротин и арсенопирит, больше тяготеют к нижним горизонтам.

Т а б л и ц а 2

Величины мультипликативных коэффициентов зональности.  
Арсеньевское месторождение, зона "Южная"

Горизонт опробования, (м)	Количество минеральных проб	Мультипликативные коэффициенты*			
		$K_p$	$K_{ж}$	$K_p K_{ж}$	$K_{Г}$
I (580)	3	30258	0,52	15734	14851
IV (450)	2	1,6	0,01	0,016	12635
VI (370)	2	0,002	0,004	0,00001	5293
VIII (230)	3	0,00002	0,02	0,000000	2087
Коэффициент контрастности		$1,5 \cdot 10^9$	26	$3,9 \cdot 10^{10}$	7,1

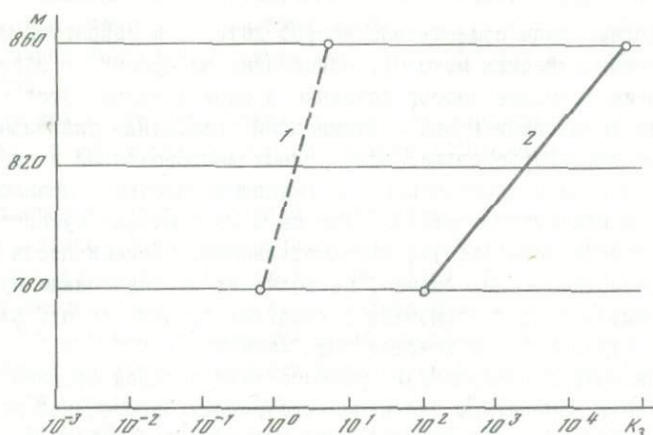
\*  $K_p = \frac{\text{сфалерит} \cdot \text{галенит} \cdot \text{халькопирит}}{\text{касситерит} \cdot \text{пирротин} \cdot \text{арсенопирит}}$ ,  $K_{ж} = \frac{\text{флюорит} \cdot \text{карбонаты}}{\text{кварц} \cdot \text{хлорит}}$   
 $K_{Г} = \frac{\text{свинец} \cdot \text{цинк} \cdot \text{серебро}}{\text{медь} \cdot \text{висмут} \cdot \text{вольфрам}}$

Как следует из табл.2, с помощью коэффициента  $K_p$  удается выявить исключительно высококонтрастную зональность (более  $1 \cdot 10^9$ ). Отчетливой, хотя и менее контрастной, является зональность  $K_{ж}$ , выражающаяся в изменении соотношений содержаний жильных минералов. Максимальной, естественно, является контрастность минеральной зональности, выявленной с помощью всех минералов, как рудных, так и жильных ( $K_p K_{ж}$ ). Сравнение приведенных в табл.2 данных показывает, что в рассматриваемом случае минеральная зональность существенно контрастнее геохимической.

Следует, однако, отметить, что не всегда минеральная зональность является столь контрастной. На рис. I приведены графики изменения с глубиной мультипликативного коэффициента минеральной зональности 3-го порядка, построенные по результатам минералогического опробования Шаумянского полиметаллического месторождения. Как видно на рис. I, минеральная зональность является на этом месторождении чрезвычайно слабоконтрастной: на глубину 80 м величина мультипликативного коэффициента (нерудные минералы-пирит-галенит, сфалерит-халькопирит) уменьшается всего в 10 раз, тогда как по Арсеньевскому месторождению (см. табл. 2) на такую же глубину мультипликативный коэффициент минеральной зональности того же порядка меняется почти в тысячу раз (см. рис. I).

Эти данные показывают, что изучение мультиминеральной зональности различных типов месторождений позволит типизировать их по контрастности минеральной зональности и увязать эти данные с генетическими и другими особенностями исследованных месторождений.

Следует, конечно, иметь в виду трудоемкость минералогических исследований, особенно выделение мономинеральных фракций и количественного минералогического анализа. Очевидно, что в данном случае внедрение в производство геологоразведочных работ рассмотренных выше методик станет реальным только при условии разработки экспрессных методов минералогических исследований. В этой связи следует ставить вопрос о более широком использовании при изучении месторождений фазового рентгеновского анализа, подобно тому как это выполнено на медно-порфировом месторождении Сан Маньхель, Аризона, США (5). По результатам рентгено-дифрактометрических анализов на этом месторождении линиями изоконцентраций околтурены отчетливые околорудные ореолы серицита, кварца, калиевого полевого шпата, плагиоклаза, из рудных минералов - пирита.



Р и с . I. Изменение мультипликативных коэффициентов минеральной зональности месторождений Шаумянское (1) и Арсеньевское (2)

Если в комплекс описанных выше способов усиления контрастности зональности включить предложенную ранее методику изучения зональности в распределении элементов-примесей в минералах (3), то станет очевидной исключительная плодотворность комплексного минералого-геохимического изучения околорудных ореолов, и прежде всего их зональности.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Барсуков В.Л., Григорян С.В., Овчинников Л.Н. Геохимические методы поисков рудных месторождений. М.: Наука, 1981. 319 с.
2. Геологический словарь. М.: Недра. 1973. Т.1. С. 486.
3. Григорян С.В., Гольдмахер И.В. Элементы-примеси в минералах для оценки геохимических аномалий.//Разведка и охрана недр. 1983. № 2. С. 29-33.
4. Соловов А.П. Геохимические методы поисков месторождений полезных ископаемых: Учеб. для вузов. М.: Недра, 1985. 294 с.
5. Hauson D.M. Application of X-ray diffraction alteration and geochemical techniques at San Manuel, Arizona. Geophysics and geochemistry in the search for metallic ores//Geol.Surv.Canada. Econ.Geol. 1979. Vol.31. P. 735-744.

УДК 550.847

Г.Б.Свешников

#### О ПЕРСПЕКТИВАХ РАЗВИТИЯ ДИСТАНЦИОННЫХ АТМОХИМИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ПОИСКОВ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

В последние годы существенно возрос интерес к разработкам дистанционных атмохимических методов, основанных на прямых определениях элементов-индикаторов непосредственно в слое воздуха. Этот интерес обусловлен выявлением новых возможностей применения указанных методов при поисках глубокозалегающих рудных месторождений в закрытых районах, решении экологических и прикладных проблем и появлением оригинальных высокочувствительных методик и аппаратуры, существенно повышающих производительность, информативность, экономичность и эффективность атмохимических съемок, позволяющих дистанционным путем определять широкий круг элементов в реальных средах без отбора проб и тем самым изучать геохимические поля *in situ*.

Сотрудниками Ленинградского университета созданы оригинальные методы и макеты аппаратуры для непосредственных определений концентраций ртути и иода в слое атмосферного воздуха. Эти методы свободны от недостатков способов, связанных с исследованием проб подпочвенного воздуха, которые часто являются непредставительными. Намечаются пер-

спективы создания новых дистанционных методов непрерывных измерений содержаний других малых газовых составляющих (МГС) в атмосфере и в космическом пространстве.

Аппаратура для геохимических исследований МГС атмосферы может использоваться как в пешеходном варианте, так и устанавливаться на различные носители, в том числе авиационные. Это дает принципиальную возможность создания комплексных подвижных аэропоисковых станций, включающих как геофизические, так и геохимические информационные каналы.

Применение таких станций наиболее целесообразно при опoисковании таежных, тундровых, пустынных и других труднодоступных малоизученных территорий.

На сегодняшний день существует и находится на различных стадиях разработки целый ряд дистанционных и экспрессных методов изучения МГС атмосферы, применимых к задачам прикладной геохимии. К ним относятся методы анализа паров ртути, молекулярных индикаторов, состава аэрозолей, лазерное детектирование атомов в атмосфере.

Ртуть, как известно, относится к числу наиболее информативных элементов-индикаторов эндогенного рудообразования [14]. Исследования последних лет, выполненные в Ленинградском университете, показали широкое развитие газовых ореолов ртути в приземной атмосфере рудных и газонефтяных месторождений, над зонами глубинных разломов (в том числе и на акваториях) и на других геологических объектах [4, 11, 17, 19]. Разработанная аппаратура позволяет проводить в атмосфере непрерывные измерения содержаний ртути с самолета, вертолета, автомашины, катера в реальном времени и экспрессную наземную съемку. Предел обнаружения ртути в воздухе составляет 10–40 нг/м<sup>3</sup> при постоянной времени 5 с. Селективность определений обеспечивается применением эффекта Зеемана и спектрально-фазовых эффектов [1, 4, 6]. Производительность наземной пешеходной съемки масштаба 1:10 000 достигает 150–180 точек в час.

К числу важных геохимических индикаторов оруденения относятся также  $J_2$ ,  $Br_2$  и некоторые другие галогенные образования -  $CO_2$ ,  $SO_2$ ,  $H_2S$ ,  $CH_4$ .

В настоящее время разработаны инструментальные методы определения указанных индикаторов в отобранных пробах воздуха хроматографическим, масс-спектрометрическим или химическим путем [1–9]. Однако наиболее перспективны дистанционные методы, позволяющие изучать поля концентраций МГС в условиях их естественного распределения в атмосфере.

В активных оптических методах используются искусственные источники излучения в видимом инфракрасном и (ИК) диапазонах спектра, в пассивных – источником служит рассеянное солнечное излучение. Низкие пределы обнаружения МГС в сочетании с селективностью определений могут быть достигнуты: абсорбционным методом для анализа  $I_2$ ,  $SO_2$ ,  $NO_2$ ,

$\text{CO}_2$  и др. при длине трассы 1–1000 м; методом корреляционной массовой и поляризационной спектроскопии в активном и пассивном режимах для анализа  $\text{I}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_2$  и др.; флуоресцентными методами для анализа  $\text{SO}_2$ ,  $\text{I}_2$ ,  $\text{Hg}$  и др.; методом комбинационного рассеяния для анализа  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_2$  и других молекул [13–20]. В методах комбинационного рассеяния и флуоресцентном наибольшие возможности реализуются при использовании лазерных источников с высокой плотностью излучения в различных областях спектра, обеспечивающей низкий предел обнаружения и селективность определений МГС [3, 10]. В Ленинградском университете проведены лабораторные и предварительные полевые испытания построенных на основе оригинальных разработок дистанционных молекулярных анализаторов для определения в атмосфере содержаний  $\text{I}_2$ ,  $\text{Br}_2$ ,  $\text{SO}_2$  и некоторых других соединений [5].

В частности, был разработан макет корреляционного молекулярного трассового газоанализатора для прямого экспрессного измерения содержания молекулярного йода в атмосфере. Этот макет испытывался как в наземных условиях, так и с вертолета при работе в пассивном режиме (при регистрации рассеянного солнечного излучения в атмосфере). На участках глубокозалегающих рудных месторождений амплитуда содержаний йода зависела от направления наблюдений. Азимутальные наблюдения, производимые в отдельных точках планшета, позволяют построить "розу концентраций" йода. При обработке результатов наблюдений в разных точках появляется возможность путем графических построений определять местоположение источника паров йода, связанного с рудной залежью или эндогенным литохимическим орудом.

В последние годы возрос интерес к изучению химического состава аэрозолей в атмосферном воздухе как индикатора геологической обстановки. Аэрозольные и субаэрозольные частицы, образующиеся при выветривании горных пород, на участках рудных месторождений обогащаются тяжелыми металлами [12]. Доказан перенос металлов в атмосферу в составе летучих элементов органических соединений в процессах жизнедеятельности высших растений, микроводорослей, почвенных микроорганизмов и микроорганизмов, метилирующих металлы [8, 23]<sup>1</sup>. Это позволяет осуществлять многоэлементный экспрессный анализ атмосферных частиц с целью поисков рудных месторождений путем дискретного или квазинепрерывного отбора проб аэрозолей [21, 22], а в перспективе – дистанционных лазерных определений тяжелых металлов в составе летучих соединений.

В результате действия ряда природных и техногенных процессов в атмосфере могут существовать металлы в атмосферном состоянии. Их концентрация, вероятно, чрезвычайно низка (ниже 1 нг/м<sup>3</sup>) и доступна для определений лазерными методами атомной флуоресценции и дифференциальной поглощения и рассеяния. Расчеты показывают возможность опре-

<sup>1</sup> Впервые это положение было высказано А.Л.Ковалевским в 50-х годах.

делений в атмосфере атомов As, Pb, Cu, Ag и некоторых других металлов при помощи мощных перестраиваемых по частоте лазеров в лидарном варианте [3].

При разработке методики комплексного геохимического изучения МГС атмосферы и выборе способов анализа необходимы сведения о геологической информативности предполагаемых индикаторов в разнообразных ландшафтно-геохимических ситуациях, а также знания их фоновых и аномальных концентраций в тропосфере.

Аппаратура должна обеспечивать низкий предел обнаружения (на уровне фоновых концентраций этих компонентов) и селективность определений, и в этом плане дистанционные оптические методы анализа имеют большие перспективы. Примеры применения дистанционных газортутных съемок на месторождениях полезных ископаемых неоднократно публиковались [14-19]. Пешеходные, автомобильные, вертолетные и самолетные съемки позволяют четко выявлять рудные и нефтегазовые геологические объекты благодаря повышенным содержаниям ртути в приземных слоях атмосферы на высотах от 1-2 м до 100-500 м от поверхности во всех типах исследованных геохимических ландшафтов. Величина и конфигурация газортутных аномалий могут изменяться во времени в зависимости от состояния метеорологических условий, однако эти аномалии всегда приурочены к участкам месторождений полезных ископаемых.

Наличие контрастных аномалий ртути в атмосфере установлено на золоторудных объектах Приполярного Урала, Чукотки, Восточного Забайкалья, Средней Азии; ртутных и ртутно-сурьмяных месторождениях Чукотки, Средней Азии; Редкометалльных объектах Приполярного Урала, Якутии, Карело-Кольского региона, Восточного Забайкалья; на нефтяных и газовых месторождениях Удмуртии, Башкирии, Ставрополя.

Характер распределения ртути в приземной атмосфере на ртутных, золоторудных, редкометалльных и других эндогенных месторождениях и устойчивость ртутных ореолов в широком диапазоне изменения метеорологических условий показывают перспективность поисковых аэрогеохимических исследований на стадиях средне- и крупномасштабного геологического картирования для изучения структурно-тектонического строения рудных провинций и выявления перспективных участков. Это подтверждается и данными дистанционной газортутной съемки, по которым установлены региональные аномалии ртути над зонами глубинных разломов, контролирующих положение ртутьсодержащих рудных и газонефтяных месторождений в Карело-Кольском регионе, в районе озера Байкал [7], в южной части линеймента Карпинского [14].

Показанная на примере дистанционного газортутного метода высокая геологическая информативность газовых ореолов рассеяния летучих компонентов литосферы определяет необходимость скорейшего развития комплекса высокоэффективных экспрессных и дистанционных методов анализа малых газовых составляющих атмосферы, являющихся индикаторами широ-

кого круга месторождений полезных ископаемых. Широкое внедрение в практику дистанционных аэрогеохимических методов позволит изучать геохимические поля геологических объектов *in situ*. Это откроет новые возможности методов прикладной геохимии, что будет способствовать более эффективному решению геологических и экологических проблем.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Альтман Э.Д., Свешников Г.Б., Туркин Ю.И., Шолупов С.Е. Зеemanовская атомно-абсорбционная спектроскопия //Журн.прикл.спектроскопии. 1982. Т.37, вып.5. С.709-722.
2. Анализ неорганических газов. Л.: Наука, 1983. 216 с.
3. Ганеев А.А., Машьянов Н.Р., Свешников Г.Б., Туркин Ю.И. О возможности прямого детектирования атомов в атмосфере //Проблемы современной аналитической химии. Л.:Изд-во ЛГУ, 1986. Вып.5. С. 3-13.
4. Ганеев А.А., Машьянов Н.Р., Свешников Г.Б., Шолупов С.Е. О возможности картирования активных тектонических структур по газовым ореолам ртути над морской поверхностью //Докл.АН СССР. 1984. Т.275, № 5. С. 1162-1164.
5. Ганеев А.А., Новиков В.А., Туркин Ю.И. Спектрально-фазовые эффекты и селективное детектирование соединений на примере иода //Журн.техн.физики. 1984. Т.54, вып.7. С. 1392-1394.
6. Ганеев А.А., Туркин Ю.И. Селективный атомно-абсорбционный анализ на основе спектрально-фазовых эффектов //Журн. прикл.спектроскопии. 1984. Т.41, вып.4. С. 549-552.
7. Ильин Ю.Т., Машьянов Н.Р., Свешников Г.Б. и др. Опыт применения газортутной съемки на акватории озера Байкал //Вестн. ЛГУ. Сер.7. 1987. Вып.1, № 7. С. 78-81.
8. Исидоров В.А. Органическая химия атмосферы. Л.: Химия, 1985. 264 с.
9. Кароль И.Л., Розанов В.В., Тимофеев Ю.М. Газовые примеси в атмосфере. Л.: Гидрометеоиздат, 1983. 216 с.
10. Лазерный контроль атмосферы. М.: Мир, 1979. 416 с.
11. Машьянов Н.Р. Опыт экспериментальной разработки метода поиска месторождений полезных ископаемых по газовым ореолам ртути в атмосфере //Вестн.ЛГУ. Сер.7. 1980. Вып.2. № 12. С.47-55.
12. Миклишанский А.З., Яковлев Ю.В., Савельев Б.В. О формах нахождения химических элементов в атмосфере //Геохимия. 1978. № 1. С.3-10.
13. Назаров И.М., Николаев А.Н., Фридман Ш.Д. Основы дистанционных методов мониторинга загрязнения природной среды. Л.: Гидрометеоиздат, 1983. 280 с.
14. Озерова Н.А. Ртуть и эндогенное рудообразование.М.:Недра, 1986. 230 с.

15. Свешников Г.Б., Машьянов Н.Р. Применение газортутной съемки при поисках рудных месторождений в северных районах Сибири //Геохимические методы поисков в северных районах Сибири. Новосибирск: Наука, 1984. С. 150-153.
  16. Свешников Г.Б., Свистов П.Ф., Туркин Ю.И., Альтман Э.Л. Атмохимические методы исследования в экологии и геологии. //Вопросы геофизики. Л.: Изд-во ЛГУ, 1983. Вып.29. С. 206-213.
  17. Свешников Г.Б., Туркин Ю.И., Свистов П.Ф. и др. А.с.457956 (СССР) Способ поисков месторождений полезных ископаемых //Опубл. в Б.И. 1975. № 3.
  18. Свешников Г.Б., Туркин Ю.И., Альтман Э.Л. и др. О применении атмохимического метода при поисках рудных месторождений //Вестн. ЛГУ. Сер. III. 1978. Вып. 18. С.28-34.
  19. Свешников Г.Б., Туркин Ю.И., Шолупов С.Е. и др. Аппаратура для дистанционного атомно-абсорбционного спектрального анализа паров ртути в атмосфере //Геохимические методы поисков глубоководных рудных месторождений. Новосибирск: Наука, 1980. С.195-199.
  20. Barringer A.R. Correlation spectrometry applied to earth resources // Princeton Univ. Conf. on Aerospace Methods. Princeton, 1970. P. 1-37.
  21. Barringer A.R. Airtrace an airborne geochemical exploration technique // I Annu. Pecora Mem. Symp. Toronto 1975. P.231-250.
  22. Barringer A.R. Surtrace a new technique for rapid multiparameter geochemical exploration: Repr. Barringer res. 1978. 16 p.
  23. Curtin G.C., King H.D., Mosier E.L. Movement of elements into atmosphere from coniferous trees in subalpine forests//J. Geochem. Explor. 1976. Vol.3, N 8. P. 245-263.
- УДК 550.84.094:546.49:553.3

В.З.Фурсов

#### ХАРАКТЕР РТУТНЫХ ОРЕОЛОВ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Ртуть, благодаря ее физико-химическим и геохимическим особенностям, начинают широко использовать в комплексе геохимических методов поисков месторождений полезных ископаемых.

Концентрирование ртути характерно для многих рудных месторождений, особенно сульфидных (ртуть, сурьма, медь, полиметаллы, олово, золото и др.), а также нерудных и месторождений нефти и газа. При эндогенных процессах в силу большой летучести ртути образуются широкие и протяженные по вертикали первичные ореолы, которые наиболее интенсивно развиваются в надрудных блоках месторождений. Летучесть определяет интенсивную возгонку ртути из рудных тел и литохимических ореолов,

что приводит к формированию газортутных ореолов рассеяния в различных средах. Высокая сорбция ртути горными породами способствует образованию наложенных ореолов рассеяния во вмещающих и перекрывающих горных породах. Большой атомный вес ртути приводит к ее накоплению в почвенном, подпочвенном, приземном воздухе и снегу над рудными месторождениями. Низкий кларк ртути позволяет на его фоне выделять малые аномальные концентрации ртути в литохимических, гидрохимических и газовых пробах. Плохая растворимость ртути в воде обеспечивает ее миграцию по трещинам через подземные воды от глубоководных месторождений к поверхности Земли. Ртуть — химически стойкий элемент, что позволяет ей находиться в форме паров в приземной атмосфере и почвенном воздухе, хотя в атмосфере много кислорода. Высокий потенциал ионизации ртути, как отмечал А.А.Сауков [4], способствует восстановлению ртути из любых ее соединений до атомарного уровня, т.е. естественной атомизации. Молекула ртути состоит из одного атома, что позволило использовать при геохимических поисках высокочувствительный атомно-абсорбционный или атомно-флюоресцентный методы анализа. Эффективный диаметр атома ртути составляет 0,3 нм, что позволяет ей мигрировать в форме газа через ультрамикropоры горных пород.

Для изучения сорбции паров ртути рыхлыми отложениями были проведены специальные эксперименты. Для этого брался прокаленный тонкозернистый кварцевый песок и производилось его квартование. После чего он разделялся на две части, которые помещались в два одинаковых стеклянных цилиндра. Высота столба песка была равна 10 см, а диаметр 7-8 см. Затем производилось измерение удельных потоков паров ртути с поверхности песка. Для этого цилиндры накрывались колпаками, внутри которых находились золотые сорбенты [2]. Фоновые значения потоков паров ртути, как правило, не различались более чем на 20%. После измерений фоновых потоков в донное отверстие одного из сосудов вставлялась фторопластовая чашечка с ртутью, налитой из медицинского термометра. Площадь поверхности чистой ртути составляла 0,03 см<sup>2</sup> и масса — 0,18-0,42 г. Вес песка был равен 510-795 г, объемный вес — 1,4-1,6 г/см<sup>3</sup>, а пористость — 30-36%. Помимо прокаленного песка, использовались непрокаленный песок и сухая глина. После подключения ртутного источника через каждые 3 мин. производились измерения потоков паров ртути с поверхности фонового песка и песка с источником. Обычно аномальный поток над поверхностью песка с источником появлялся через 9-11 мин. После этого производились систематические одновременные измерения потоков в фоновом сосуде и сосуде с источником в заданные промежутки времени. При вычислении удельного аномального потока поток фонового песка вычитался из потока аномального. Время формирования наложенного ореола рассеяния в рыхлых отложениях за счет ртутного источника изменялось от 0,2 до 94,4 сут. (табл. I). После заданного времени формирования наложенного ореола источник отключался (чашечка со ртутью удалялась). В некоторых случаях после удаления источника

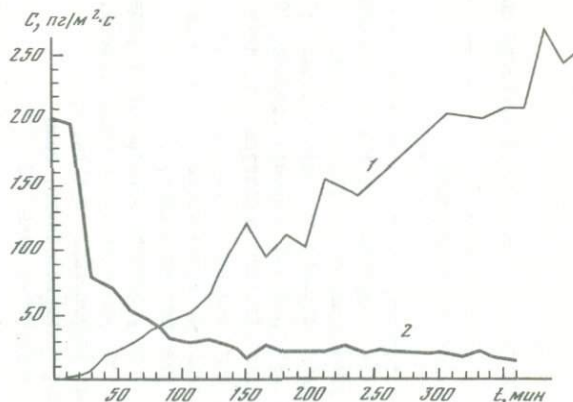
производились измерения потоков над фоновым песком и ореольным песком, т.е. исследовался процесс дегградации (разрядки) наложенного ореола во времени. На рис. I показаны графики "зарядки" и "разрядки" кварцевого песка с ртутью. После прохождения паров ртути через песок происходило нарастание потоков паров ртути, и через 400 мин удельный поток достигает  $270 \text{ мкг/м}^2\text{с}$ . Затем в течение 6 сут поток практически мало изменялся, т.е. устанавливалось равновесное состояние между парами ртути, поступившей из источника, сорбированной и проходящей сквозь песок ртутью. После отключения источника аномальный поток продолжал фиксироваться над поверхностью песка за счет дегградации (десорбции) ореола (см. рис. I). Разрядка наложенного ореола сначала происходила интенсивно, затем скорость разрядки медленно снижалась. За 30 мин. разрядки удельный поток паров ртути уменьшился с 201 до  $78 \text{ мкг/м}^2\text{с}$ , спустя 360 мин он стал равен  $13 \text{ мкг/м}^2\text{с}$ , а через 146 дн. поток уменьшился до  $1,3 \text{ мкг/м}^2\text{с}$  при потоке с поверхности фонового песка  $0,1 \text{ мкг/м}^2\text{с}$ .

После отключения источника определялось содержание ртути в твердой фазе атомно-абсорбционным газоанализатором ИМГРЭ-8 в пробах фонового и ореольного песка. Если исследовалась дегградация ореола, то анализ литохимических проб производился после этого. Пробы из фонового и ореольного сосудов вычерпывались сверху вниз послойно (толщина слоя 1 см) и после тщательного квартования производился 4-8-кратный анализ пробы каждого слоя фонового и ореольного песка на ртуть. Наложенная (сорбированная) составляющая ртути для каждого слоя определялась путем вычитания концентрации ртути в фоновом песке из значений ореольного песка. Благодаря такой методике появилась возможность изучить соотношение между сорбированной (наложенной) и газовой составляющими ртути, а также определить другие важные показатели для ореолов. С ростом времени формирования наложенного ореола растет концентрация наложенной составляющей. Чем ближе слой к источнику, тем, естественно, и больше концентрация ртути в нем (рис. 2). Средние концентрации ртути для всех слоев наложенного

ореола также растут со временем с  $0,4$  до  $33,9 \cdot 10^{-7}\%$ . Боль-

Р и с . I. Изменение потока паров ртути через поверхность песка

1 - при наличии источника; 2 - при десорбции (деградации) наложенного ореола (источник отсутствует)



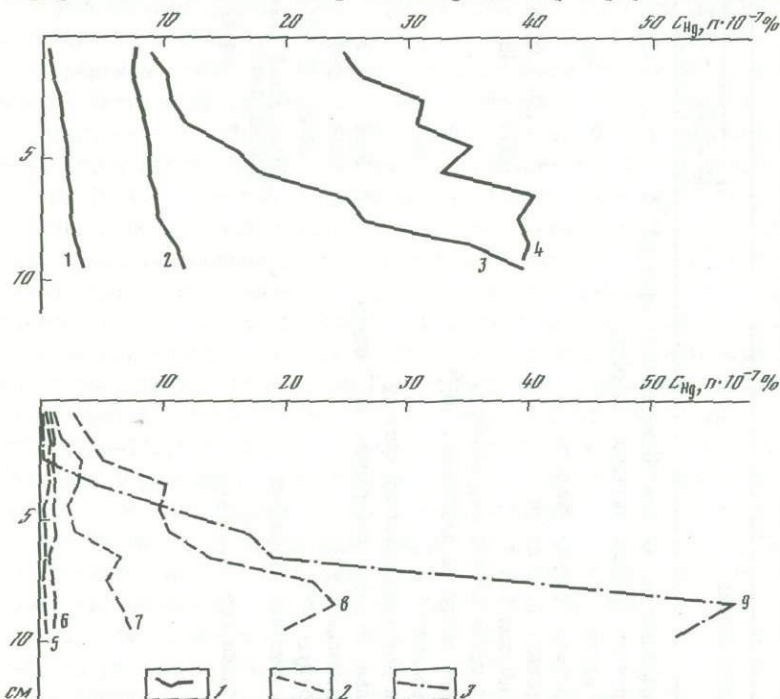
Основные данные по формированию наложенного ореола рассеяния ртути в кварцевом песке и сухой неуплотненной глине

Основные характеристики	Дата эксперимента						
	25.II. 87*г.	25-28.5. 87 г.	28.I0-3. II.86 г.	5-16.6. 87 г.	21,5-23. 6.87 г.	29.6-26. 10.87 г.	5.II-3.I2. 87 г. **
Среднее содержание ртути в ореоле(без фона), $10^{-7}\%$	0,4	2,1	5,6	9,3	20,1	33,9	20,2
Среднее фоновое содержание ртути, $10^{-7}\%$	1,4	1,9	2,1	1,0	2,9	2,3	24,9
Средняя удельная скорость сорбции, $10^{-4}$ пг/гс	278	75	136	98	73	42	83
Средняя удельная скорость сорбции, $10^{-4}$ пг/см <sup>3</sup> с	434	121	190	159	118	68	116
Средняя удельная сорбируемость, пг/г	420	2140	5891	9270	20130	34105	20170
Средняя удельная сорбируемость, пг/см <sup>3</sup>	655	3467	8248	15017	32208	55592	34289
Минимальное время жизни ореола, годы	0,3	1,2	3,4	5,3	11,6	19,7	-
Вес ртутного источника, г	0,18	0,21	0,42	0,26	0,18	0,16	0,26
Мощность источника, перекрытого породами, пг/с	8,7	7,9	6,6	8,4	7,2	4,2	5,2
Скорость миграции ртути через породы, см/мин	-	1,1	0,8	1,1	1,1	1,6	0,25 см/сут.
Время формирования ореола, сут.	0,2	3	6	11	32	94,4	28
Время жизни источника, годы	656	843	2018	982	793	1208	1586
Температура воздуха, °С	17	20	15-22	20-24	16-20	15-22	16-20

\* Непрокаленный кварц.

\*\* Глина.

шая скорость роста характерна для непрокаленного песка, что объясняется сохранением органических и неорганических соединений, которые более интенсивно сорбируют ртуть. В прокаленном кварцевом песке таких соединений осталось, по-видимому, меньше. Такой вывод вытекает из сравнения графиков концентраций 2,3 для прокаленного песка и 7,8 для непрокаленного, которые получены для разного времени формирования наложенных ореолов рассеяния ртути. Средняя удельная скорость сорбции, определенная для всех слоев в непрокаленном песке, изменяется от  $156 \cdot 10^{-4}$  до  $451 \cdot 10^{-4}$  пг/гс, а в прокаленном - от  $42 \cdot 10^{-4}$  до  $136 \cdot 10^{-4}$  пг/гс, что также свидетельствует о большей сорбируемости непрокаленным песком паров ртути (табл.2). Средняя удельная скорость сорбции паров ртути глиной равна только  $83 \cdot 10^{-4}$  пг/гс. Такое низкое значение при высокой сорбционности глины объясняется незначительным коэффициентом диффузии паров ртути в глине по сравнению с таковым в песке. Наибольшие концентрации ртути в нижних слоях, как и следовало ожидать, характерны для наложенного ореола в сухой неуплотненной глине (график 9). Наибольшая скорость миграции паров ртути от источника



Р и с. 2. Изменение концентраций ртути с глубиной в наложенных ореолах при различном времени их формирования

1 - прокаленный кварцевый песок; 2 - непрокаленный кварцевый песок; время формирования: 3 - сухая неуплотненная глина. 1 - 3 сут; 2 - 11 сут; 3 - 32 сут; 4 - 94 сут; 5 - 0,2 сут; 6 - 0,7 сут; 7 - 1 сут; 8 - 4 сут; 9 - 28 сут,

Некоторые величины наложенного ореола рассеяния, образованного парами ртути

Основные характеристики	Дата эксперимента							
	21.5-23.6.87 г.	29.6-1.10.87 г.	25.II.87 г.	26-27.II.87 г.	14-15.7.87 г.	29.6-2.7.87 г.	5.II-3.12.87 г.	
Средняя концентрация наложенной составляющей ртути, $10^{-7}\%$	20,1	33,9	0,4	0,9	3,9	12,2	20,2	
Диффузионный поток. Средняя удельная скорость сорбции, $10^{-4}$ пг/гс	73	42	278	156	451	353	83	
Диффузионный поток. Средняя удельная скорость десорбции, $10^{-4}$ пг/гс	0,24	0,86	0,55	0,55	0,55	0,55	-	
Величина соотношения 2 к 3	304	49	506	284	820	642	-	
Принудительный поток по второму способу.								
Средняя удельная скорость десорбции, $10^{-4}$ пг/гс	88	8	3	3	32	248	5	
Величина соотношения 5 к 3	367	9	5	5	58	451	-	
Принудительный поток по третьему способу.								
Средняя удельная скорость десорбции, $10^{-4}$ пг/гс	1682	219	46	60	130	1329	27	
Величина соотношения 7 к 3	7008	255	84	109	236	2416	-	
Температура воздуха, $^{\circ}\text{C}$	16-20	15-22	17	17	20-21	20-21	16-20	
Перекрывающие источник отложения	Прокаленный кварцевый песок						Непрокаленный кварцевый песок	Глина
Время формирования ореола, сут.	32	94,4	0,2	0,7	1	4	28	

к поверхности рыхлых отложений характерна для песка и составляет 0,8-1,6 см/мин. Для глины скорость существенно уменьшается и достигает только 0,25 см/сут, что объясняется большей сорбционностью глин и замедленной диффузией паров ртути песка (см. табл.1).

Так как скорость десорбции (деградации) ореола во времени уменьшается по экспоненциальному или более сложному закону, использование средней удельной скорости десорбции при начальном времени разрядки позволит определить только минимальное время жизни ореола. Фактическое время жизни деградирующего ореола может быть значительно больше. Удельная скорость десорбции ртути из песка определена только при двух экспериментах и равна  $0,24 \cdot 10^{-4}$  и  $0,86 \cdot 10^{-4}$  г/гс. Для определения времени жизни ореолов в других экспериментах использовалось среднее значение удельной скорости десорбции, равное  $0,55 \cdot 10^{-4}$  г/гс (см. табл.2). Минимальное время жизни ореола в песке зависит от концентрации наложенной составляющей и изменяется в экспериментах от 0,3 до 19 лет (см. табл.1). Устойчивое формирование наложенных ореолов в песках и сравнительно значительное время их деградации (время жизни) вызвано значительным превышением средней удельной скорости сорбции над десорбцией. Их соотношение изменяется от 49 до 820 (см. табл.2).

Эксперименты позволили получить грубые оценочные данные по формированию и деградации наложенных ореолов рассеяния для реальных условий в сухих песках, лёссах и глинах. Мощность (производительность) источника паров ртути была равна средней величине 6,9 г/с, полученной из данных табл.1. Так как в природных условиях объем наложенных ореолов значительно превышает объемы, полученные при экспериментах, то при подсчетах использовалось 1000 источников на площади  $1500 \text{ м}^2$  при разных мощностях перекрывающих отложений. Поверхность ртути единичного источника, как указывалось выше, была равна  $0,03 \text{ м}^2$ . Для формирования наложенных ореолов за счет точечных источников, рождающихся постоянно в зоне гипергенеза рудных месторождений, необходимо (в зависимости от средних концентраций ореола и мощности перекрывающих отложений) 0,285-142,5 кг ртути. Количество ртути 0,285-142,5 кг, необходимое для образования ореолов при мощности перекрывающих отложений не более 100 м, в реальных условиях месторождений вполне возможно. На основании изучения распределения ртути в первичных ореолах и рудах на 12 промышленных полиметаллических месторождениях Казахстана установлено, что минимальное суммарное количество ртути в месторождениях (руды и ореолы) изменяется от 7,8 до 34,5 т. Следовательно, из такого количества ртути за 1310-655 000 лет могут реально образоваться наложенные ореолы указанных концентраций для мощности 10-100 м (табл.3). При этом концентрации в поверхностных слоях перекрывающих отложений будут меньше средних концентраций, так как первые возрастают с глубиной (см. рис.2). В случае прекращения деятельности источника время деградации этих наложенных ореолов 6 тыс. лет-3 млн. лет. Время деградации определено из условия экспериментов, где поток деградированно-

Т а б л и ц а 3

Оценочные данные по наложенным ореолам рассеяния ртути, развитым в перекрывающих отложениях (песок, сухая глина, лёс) при разных содержаниях ртути. Площадь ореола 15 000 м<sup>2</sup> (50 x 300 м)

Некоторые данные	Мощность слоя 10 м			Мощность слоя 100 м			Мощность слоя 1000 м		
	$1 \cdot 10^{-7}\%$	$10 \cdot 10^{-7}\%$	$50 \cdot 10^{-7}\%$	$1 \cdot 10^{-7}\%$	$10 \cdot 10^{-7}\%$	$50 \cdot 10^{-7}\%$	$1 \cdot 10^{-7}\%$	$10 \cdot 10^{-7}\%$	$50 \cdot 10^{-7}\%$
Количество ртути в ореоле, кг	0,285	2,85	14,25	2,85	28,5	142,5	28,5	285	1425
Время формирования ореола, 10 <sup>3</sup> лет	1,31	13,1	65,5	13,1	131	655	131	1310	6550
Время деградации ореола, 10 <sup>3</sup> лет	6,02	60,25	301,25	60,25	602,5	3012,5	602,5	6025	30 125
Удельная сорбируемость, мг/см <sup>3</sup>	1900	19 000	95 000	1900	19 000	95 000	1900	19 000	95 000

го ореола с поверхности песка через 115 дней варьирует около величины  $1 \text{ мкг/м}^2 \text{ с}$  т.е. с ореольной поверхности размером  $15\,000 \text{ м}^2$  уйдет в атмосферу за год  $0,473 \text{ г}$  ртути.

На основании обобщения материалов ртутнометрических работ, выполненных на 70 месторождениях в разных регионах Союза и за рубежом, ниже приводится анализ характера развития ореолов над открытыми, слепыми, погребенными и погребенными слепыми рудными месторождениями. Помимо собственных исследований автора, использованы результаты работ, выполненных совместно с геохимическими организациями Урала, Таджикистана, Дальнего Востока и других регионов, а также опубликованные данные.

**Открытые месторождения.** Над открытыми ртутными и нертутными месторождениями за счет рудных тел и первичных ореолов образуются остаточные, сорбированные и газортутные ореолы рассеяния в почвенном воздухе и приземной атмосфере. При этом, как правило, газортутные ореолы рассеяния в почвенном воздухе по размерам меньше литохимических ореолов ртути, и максимальные значения паров ртути фиксируют выходы рудных тел под элювио-делювиальными образованиями. На нертутных месторождениях вторичные остаточные литохимические ореолы рассеяния ртути по размерам меньше ореолов рудообразующих элементов.

Основные факторы, влияющие на интенсивность газортутных ореолов в почвенном воздухе, следующие: концентрация ртути и формы ее нахождения в рудных телах и литохимических ореолах, интенсивность окислительных процессов, перепад температур и характер поверхностных рыхлых отложений. Чем больше концентрация ртути в рудах и литохимических ореолах, тем при прочих равных условиях интенсивнее поток паров ртути и больше концентрация в газортутных ореолах. Из всех форм нахождения ртути наиболее летучей является самородная ртуть и наименее — киноварь. Следовательно, наличие в рудных телах и литохимических ореолах легковозгоняемой ртути (самородная, ртутьорганические соединения, галогены и другие формы) существенно повышает долю газовой составляющей по сравнению с теми месторождениями, где эти формы присутствуют в малых количествах.

Развитие зоны окисления месторождений интенсифицирует процесс возгонки атомарной ртути из рудных тел и литохимических ореолов. Экспериментальными работами было показано, что возгонка ртути из руд увеличивается при увеличении влажности руд. Измельченная киноварная руда с частицами менее  $2 \text{ мм}$  и содержанием  $0,78\%$  Hg помещалась в деревянный ящик, дно которого было стеклянным. Интенсивность возгонки определялась путем измерения потоков паров ртути, идущих с поверхности руды в атмосферу. При объемной влажности руды  $5\%$  удельные потоки паров ртути в атмосферу были равны  $4-7 \text{ мкг/м}^2 \text{ с}$ , а при увеличении влажности до  $70\%$  потоки возрастали до  $240-300 \text{ мкг/м}^2 \text{ с}$ . По мере испарения влаги потоки уменьшались и достигали прежних значений. Дополнительный

приход влаги в руду, а с влагой и привнос кислорода интенсифицировали окисление киновари и восстановление ртути.

Кварцевые и баритовые жилы, вмещающие рудные минералы, в поверхностных условиях зоны окисления очень устойчивы, что существенно ограничивает выход паров ртути из них. Это характерно и для легковозгоняемых форм ртути, например амальгамы золота в кварцевой плотной рубашке. Потенциально есть легковозгоняемый источник паров ртути, но реально пары ртути не могут выйти из кварцевой рубашки, так как замурованы в ней. При дальнейшем выветривании, дезинтеграции руд и формировании остаточных ореолов создаются условия для выхода паров ртути.

Интенсивность возгонки также зависит от площади рудной и ореольной поверхности. Чем больше эти поверхности, тем большее количество ртути при прочих равных условиях перейдет в газовую фазу. Чем меньше по размерам частицы в остаточном ореоле, тем интенсивнее возгонка ртути. Если рудные и ореольные частицы находятся на поверхности Земли, то возгонка ртути из них при одинаковой температуре идет более интенсивно, чем из частиц, находящихся внутри рыхлых отложений.

Суточные, месячные, годовые и вековые перепады температур на участках развития литохимических ореолов и руд обуславливают синхронные процессы возгонки-конденсации паров ртути и ее соединений. При этом в течение длительного геологического времени происходит, по-видимому, необратимый медленный процесс преобразования ртути из одних форм в другие. Тенденция этого процесса состоит в образовании таких форм ртути, из которых она испаряется более интенсивно при меньших температурах [7].

Интенсивность газортутных ореолов рассеяния в почвенном воздухе зависит от скорости не только поступления ртути из руд и литохимических ореолов, но и от ухода паров ртути из ореола в атмосферу. Скорость ухода (или аэрации) наибольшая для щебенистого элювия-делювия и наименьшая для суглинистых и глинистых отложений. Для количественной характеристики перехода ртути из почвы в атмосферу могут использоваться удельный и ореольный потоки паров ртути. Наиболее высокие концентрации паров ртути характерны для ртутных месторождений и рудопроявлений, интенсивность которых достигает 100 000 пг/л и более при фоне 10 пг/л. Контрастные ореолы характерны и для сурьмяных месторождений - 5000 пг/л. На двух полиметаллических месторождениях Рудного Алтая максимальные значения паров ртути в почвенном воздухе над выходом рудных тел изменяются от 13 000 до 14 000 пг/л при фоне 5-10 пг/л. На одном из золоторудных месторождений Кавказа над выходом рудного тела максимальное значение паров ртути достигает 82 000 пг/л при фоне 10 пг/л.

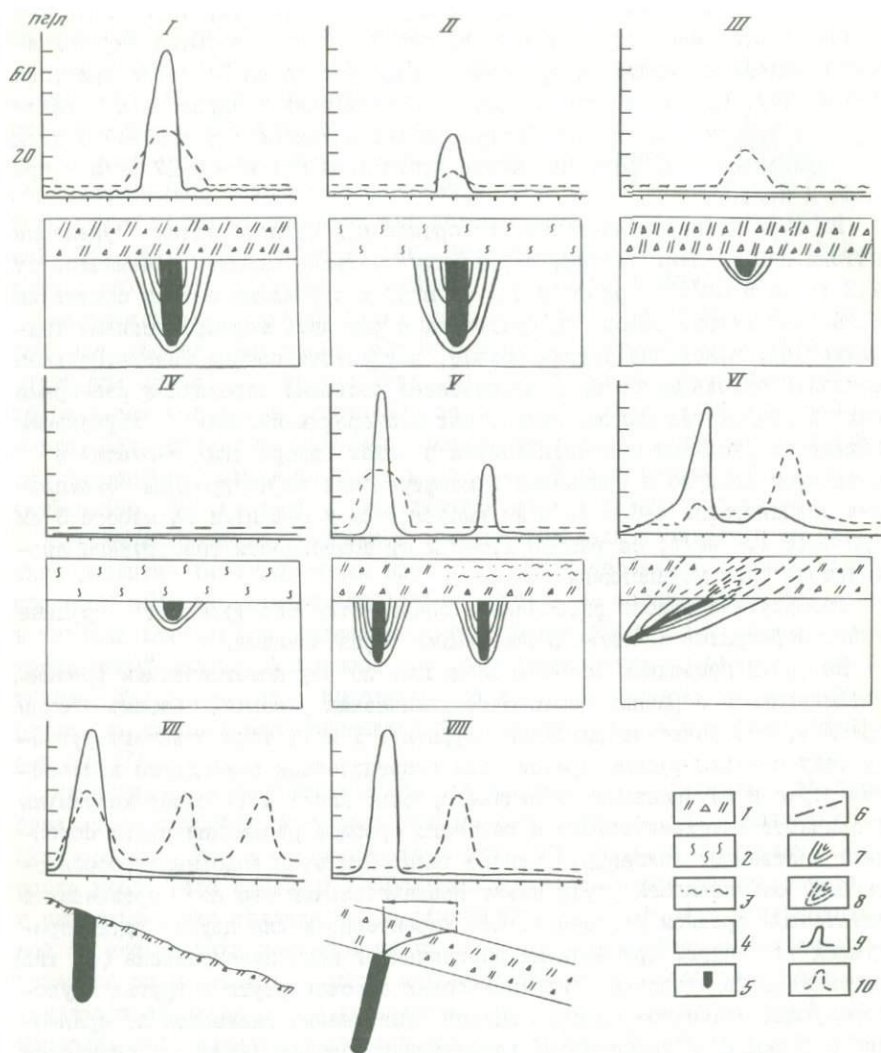
Удельные потоки, измеренные на ртутных месторождениях Таджикистана, перекрытых элювио-делювиальными образованиями, изменяются от 4,7 до 44 пг/м<sup>2</sup>с при фоне 0,3-0,4 пг/м<sup>2</sup>, а ореольные потоки паров ртути в атмосферу изменяются в пределах 1,98-4,16 г/год, что свидетельст-

вует о незначительной миграции паров ртути в атмосферу. При такой миграции в приземной атмосфере на высоте 0,2-1 м образуются неустойчивые и малоинтенсивные газортутные ореолы рассеяния 3-7 пг/л при фоне 1,5-2 пг/л. На одном из сурьмяных месторождений Таджикистана газортутные ореолы в почвенном воздухе имеют интенсивность 500-4700 пг/л, а в приземной атмосфере на высоте всего лишь 0,1 м - 6-27 пг/л при фоне 2 пг/л.

На двух полиметаллических месторождениях Рудного Алтая удельные потоки над рудными телами, перекрытыми элювио-делювием, изменялись от 2,6 до 14,6 пг/м<sup>2</sup>с при фоне 0,4 пг/м<sup>2</sup>с, а ореольные потоки составили 6,76-7,97 г/год. Здесь, по сравнению с ртутными месторождениями Таджикистана, ореольные потоки больше, а удельные потоки меньше. Большая величина ореольных потоков обусловлена большими площадными размерами выхода рудных тел полиметаллических месторождений. Над изученными полиметаллическими месторождениями в зонах газортутных аномалий в почвенном воздухе в приземной атмосфере были зафиксированы аномальные концентрации 4-6,5 пг/л на высоте 1 см и 3-4 пг/л на высоте 3 см при фоне 1,6 пг/л. На высоте 1,5-2 м от поверхности газортутные аномалии не были установлены.

Газортутные ореолы рассеяния в почве четко оконтуривают рудные тела, перекрытые элювио-делювиальными образованиями.

На рис.3 приведены обобщенные данные по ртутнометрическим ореолам, развивающимся в разных геолого-геохимических условиях (восемь типов ореолов, обозначенные римскими цифрами). I и II типы отвечают рудному телу с верхнерудным срезом, где сосредоточены наибольшие количества ртути и интенсивные первичные ореолы. Для I и II типов максимумы вторичного литохимического и газового ореолов рассеяния ртути совпадают и отвечают эпицентру рудного тела. При этом наложенная (сорбированная) составляющая ртути имеет незначительный вес по сравнению с остаточным ореолом рассеяния, что характерно и для других рудообразующих элементов. При наличии выщелоченной коры выветривания (II тип) интенсивность вторичных литохимических ореолов ртути и других рудообразующих элементов за счет выноса существенно снижается по сравнению с I типом. Интенсивность газортутного ореола также снижается (II тип), но в меньшей степени, что объясняется существованием постоянного потока паров ртути от рудного тела и первичных ореолов к поверхности. При этом одна часть потока проходит в почву и атмосферу, а другая - идет на формирование наложенных ореолов рассеяния. Отсюда процент наложенной составляющей во вторичном литохимическом ореоле ртути выщелоченной коры выветривания значительно больше такого по сравнению с I типом. Это явление наблюдается и для других рудообразующих элементов и элементов-спутников. В условиях мощного развития выщелоченных кор выветривания возможно отсутствие с поверхности и рудообразующих элементов.



Р и с. 3. Газортутные ореолы рассеяния над открытыми рудными телами

I, 2 - верхнерудный срез первичных ореолов; III, IV - нижнерудный срез первичных ореолов ртути; V - участки чередования элювио-делювиальных и дальнеприносных отложений (мощность 0-5 м); VI - газортутный ореол над пологопадающим рудным телом (вертикальный разрез остаточного ореола по А.П.Соловову); VII - газортутные и литохимические ореолы рассеяния на склоне; VIII - газортутный и смещенный литохимический ореолы рассеяния на плоском склоне (график смещения по А.П.Соловову)

1 - элювио-делювий; 2 - выщелоченная кора выветривания; 3 - дальнеприносные отложения; 4 - вмещающие породы; 5 - рудные тела; 6 - тектонические нарушения; 7 - первичные ореолы ртути; 8 - остаточные литохимические ореолы рассеяния ртути; 9 - содержание паров ртути в почвенном воздухе; 10 - содержание ртути в остаточном ореоле рассеяния

Элювиально-делювиальные образования для I типа представлены щебенкой, глинами, песками, супесями и суглинками, иногда с глыбами пород. В этом случае литохимический остаточный ореол рассеяния ртути больше по площади газортутного ореола рассеяния. В выщелоченной коре выветривания (II тип) размеры газового и вторичного литохимического ореолов часто соизмеримы.

III и IV типы отвечают нижнерудному срезу, когда количество ртути в рудах и первичных ореолах существенно меньше по сравнению с таковым верхнерудного среза из-за высокой летучести ртути. Для III типа возможно наличие вторичного остаточного ореола рассеяния ртути низкой интенсивности при высоких концентрациях рудообразующих элементов в остаточных ореолах нертутных месторождений. В этом случае газортутный ореол отсутствует. Для IV типа возможно полное отсутствие остаточного и газового ореола рассеяния ртути. В открытых районах часто сочетание участков развития открытых и закрытых остаточных ореолов рассеяния. Закрытость их может быть обусловлена золотыми отложениями или делювиально-пролювиальными отложениями безрудных пород. Мощность этих отложений часто небольшая — 1–5 м, но она в большинстве случаев достаточна для экранирования остаточных ореолов рассеяния. В этом случае над открытым рудным телом с верхнерудным срезом в элювио-делювии развиваются четкий остаточный ореол ртути и других рудообразующих элементов с элементами-спутниками и газортутный ореол (V тип). Над погребенным рудным телом литохимические ореолы ртути и рудообразующих элементов могут в этом случае не фиксироваться с поверхности. Газортутный же ореол ртути и в этом случае четко фиксирует рудное тело. В соответствии с теоретическими и практическими данными, положение максимума вторичного остаточного литохимического ореола рассеяния отвечает эпицентру выхода вертикального рудного тела на поверхность коренных пород при горизонтальной дневной поверхности. В остальных случаях максимум ореола смещается относительно эпицентра оруденения на "расстояние, зависящее от элементов его залегания, рельефа местности, мощности рыхлых образований, глубины опробования и ряда других причин" [5, с.130]. При углах падения рудных тел менее  $45^\circ$  смещение максимума ореола относительно проекции коренного оруденения может достигать существенной величины [5]. При этом (VI тип) в эпицентре рудного тела будет интенсивная газортутная аномалия при незначительной литохимической аномалии ртути и других рудообразующих элементов. Над смещенными максимумами литохимических ореолов ртути и рудообразующих элементов возможно образование газортутного ореола небольшой интенсивности или его отсутствие. Тип VII отвечает смещение части остаточного ореола вниз по склону с образованием нескольких максимумов, что может быть вызвано неоднородным разубоживанием ореольных частиц частицами пород с фоновыми содержаниями за счет золотых неравномерных осадков, или перемещением материала временными водными потоками по склону, или другими причинами. В этом случае га-

вортутный ореол рассеяния проявляется только в эпицентре рудного тела.

На плоском склоне рыхлые отложения перемещаются вниз совместно с развитыми в них остаточными ореолами рассеяния. Величина такого смещения достигает в Восточном и Северном Прибайкалье 30–80 м, Бурятии 250–300 м, на Чукотке 130–150 м, в Восточной Сибири и Приморье 10–30 м [5]. При этом над эпицентром рудного тела вторичные литохимические ореолы различных элементов не отмечаются, а газортутные ореолы рассеяния в почвенном воздухе выявляются.

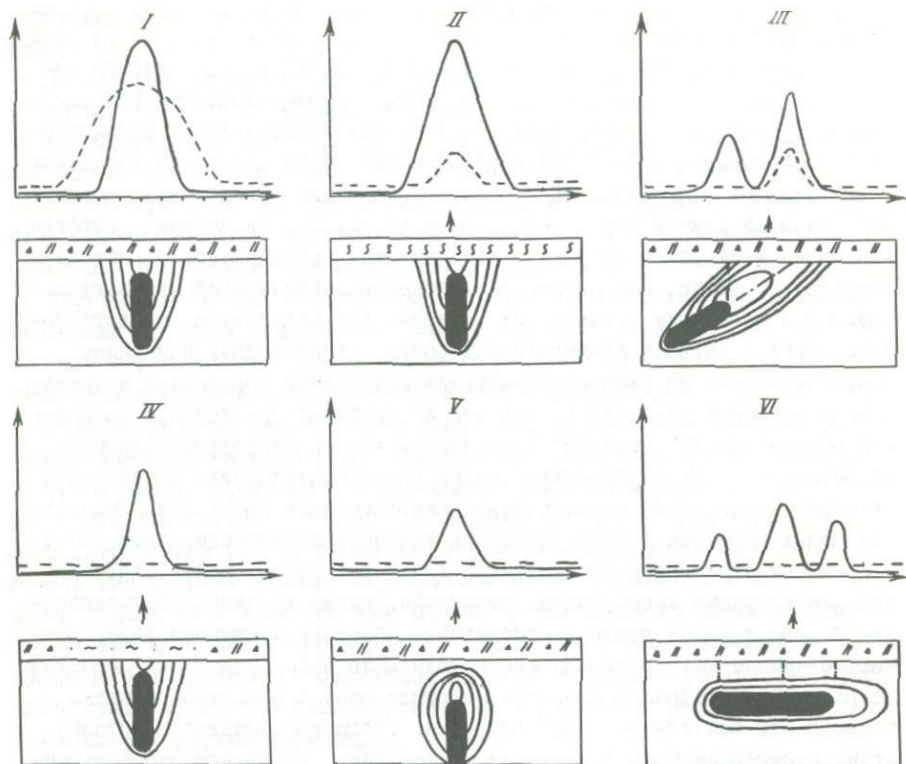
Отсутствие газортутных аномалий над смещенными вторичными литохимическими ореолами объясняется тем, что ртутная масса их недостаточна для формирования газовых ореолов, учитывая уход паров ртути в атмосферу и окружающие рыхлые отложения. Для образования динамически устойчивых газовых ореолов рассеяния ртути в почвенном воздухе необходима минимальная суммарная (критическая) масса ртути, находящаяся в рудном теле, первичном и вторичном литохимических ореолах. Эта масса должна постоянно восполнять уход паров ртути из газортутного ореола. Газортутные ореолы рассеяния в почвенном воздухе могут отсутствовать над рудными телами, перекрытыми элювио-делювием, в том случае, когда рудные тела и их литохимические ореолы являются недостаточным аномальным источником паров ртути. Если в рудах месторождений и литохимических ореолах концентрация ртути не превышает  $(5-20) \cdot 10^{-6}\%$ , то часто таких количеств недостаточно для образования динамически устойчивых газортутных ореолов.

Глубокозалегающие месторождения. Чтобы над глубокозалегающими месторождениями сформировались ртутные ореолы из паров и соединений ртути, им необходимо пройти сложный и нелегкий путь миграции от рудных тел и литохимических ореолов по тектоническим трещинам сквозь толщу пород к поверхности. При этом ртуть в форме паров, ионов, неорганических или органических соединений может мигрировать в газовом и водном потоках. По мере продвижения потоков к поверхности земли формы нахождения ртути могут преобразовываться за счет изменения физико-химических и биогеохимических условий. Ртуть из водных или газовых потоков при миграции в значительной степени сорбируется горными породами и частично заполняет поры горных пород. При этом происходит многократное чередование процессов сорбции-десорбции ртути с изменением видов миграции (газ или воды) и форм ее нахождения. Во время миграции поток ртутных газов может меняться по интенсивности вплоть до исчезновения на некоторое время вследствие изменения тектонических, гидрогеологических, физико-химических и биогеохимических условий. Несмотря на препятствия и барьеры, фронт аномального потока сорбированной и газовой ртути приближается к почве, где образуются газортутные и наложенные ореолы рассеяния. При временном исчезновении ртутного потока от источника наложенные и газортутные ореолы питаются за счет ртутных газов, образующихся при десорбции (деградации) наложен-

ных ореолов нижележащих горных пород в соответствии с результатами экспериментов, описанных выше. Сорбированные (наложенные) ртутные ореолы рассеяния в перекрывающих кристаллических породах невозможно пока отличить от первичных ореолов ртути, сформировавшихся при эндогенных процессах. Следовательно, с течением времени фронт псевдопервичных (сорбированных) ореолов ртути может перемещаться по вертикали и латерали от месторождений к поверхности земли, увеличивая объем и вертикальный размах первичных ореолов ртути. С увеличением глубины залегания месторождений уменьшается интенсивность ртутного потока к поверхности земли, что приводит к снижению концентраций газортутных ореолов в почвенном воздухе. Это вызвано разубоживанием газового потока ртути в большом объеме горных пород, существенным снижением скорости потока за счет перекрывающих водоносных горизонтов и уменьшением возгонки ртути из рудных тел и первичных ореолов при замедлении окислительных процессов. Развитие макро- и микротрещиноватости во вмещающих и перекрывающих породах способствует усилению скорости миграции паров ртути и возрастанию окислительных процессов. Вследствие малых размеров атомов ртути при микротрещиноватости пород 0,4-0,5 нм они становятся проникаемыми для паров ртути. Более благоприятны для миграции газов рыхлые отложения, затем хрупкие кристаллические породы и менее всего — пластичные. Напорные трещинные воды, омывающие рудные месторождения или встречающие выше рудных тел газовый поток, могут увеличить скорость миграции газа к поверхности путем полного или частичного переноса ртути. Субгоризонтальные пластовые воды, залегающие выше рудных тел, существенно уменьшают скорость миграции газового потока. Если эти воды мигрируют в сторону от рудных залежей с большей скоростью, чем скорость газового потока, проходящего сквозь воды, то ртутные газы могут быть разубожены до фоновых концентраций. Перенос ртути происходит в масштабах геологического времени, начиная с момента зарождения месторождения и кончая его исчезновением, а перекрывающие пластовые воды и другие препятствия по сравнению с жизнью месторождения существуют непродолжительное время.

Газортутные ореолы рассеяния в почвенном воздухе установлены над слепыми ртутными, сурьмяными, полиметаллическими, медноколчеданными, медными и оловорудными месторождениями интенсивностью 30-1700 мкг/л при фоне 5-15 мкг/л.

На рис.4 приведена схема развития ртутнометрических ореолов над слепыми месторождениями (показано шесть типов). Наиболее благоприятными для формирования ртутных ореолов с поверхности являются такие месторождения, где первичные ореолы выходят под эдьюисо-деквазивальные образования. В этом случае над слепыми рудами развиваются интенсивные вторичные литохимические и газовые ореолы рассеяния ртути (I тип). При наличии коры выветривания вторичные литохимические ореолы часто уменьшаются по интенсивности при контрастных газортутных ореолах (II тип). Интенсивность газортутных ореолов при этом поддерживается



Р и с . 4. Газортутные ореолы рассеяния ртути над слепыми рудными телами

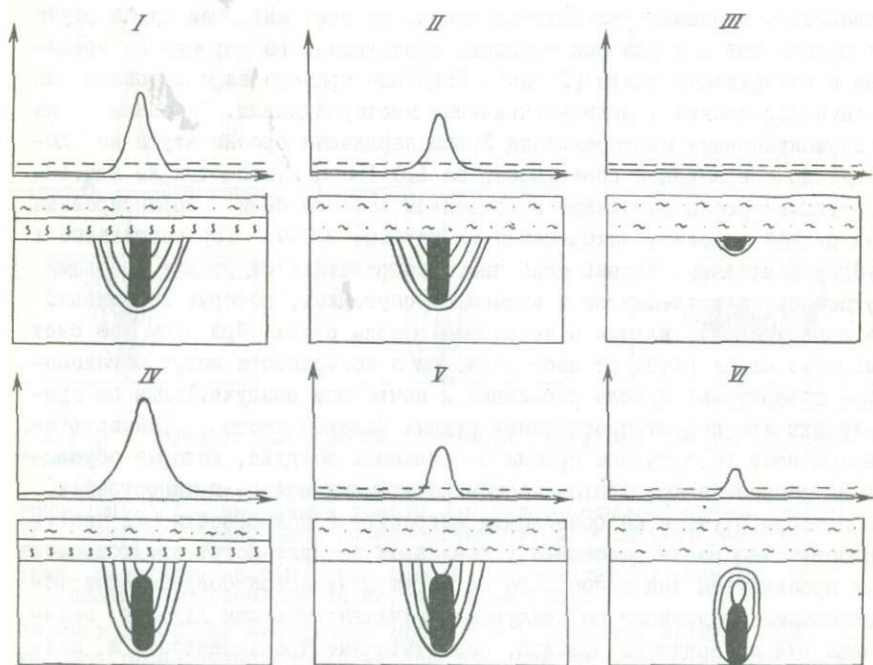
I, II - участки, перекрытые элювио-делювием и древней корой выветривания; III - первичные ореолы над пологопадающим рудным телом; IV - участки чередования элювио-делювиальных и дальнеприносных отложений (мощность 0-5 м); V, VI - газортутные ореолы над рудными телами, первичные ореолы ртути которых не выходят на поверхность  
Условные обозначения те же, что и на рис.3.

за счет десорбции наложенных ореолов в коре выветривания и продолжающегося гипергенеза первичных ореолов, при котором возникают новые источники ртути. Формирование ртутных и рудообразующих первичных ореолов над слепыми залежами определяется положением тектонических трещин, по которым мигрировали рудоносные растворы и газовые потоки при эндогенном рудообразовании. При развитии вертикальных трещин максимальные концентрации ртути в первичном и газортутом ореолах совпадают с эпицентром рудного тела (месторождения). Максимум вторичного литохимического ореола, формирующегося за счет первичного, также совпадает с эпицентром рудного тела (I и II тип). При наклонных трещинах происходит смещение литохимических и газовых ореолов относительно эпицентра рудного тела. На рис.4 (III тип) изображено наклонное рудное тело с наклонными первичными ореолами ртути, локали-

зовавшимися по трещинам при эндогенных процессах. Послерудные тектонические процессы могли привести к формированию системы вертикальных тектонических трещин, по которым мигрируют газовые потоки от рудного тела и нижней части первичного ореола к поверхности. В итоге над наклонным рудным телом в почвенном воздухе могут образоваться два самостоятельных газорудных ореола. Над рудоконтролирующей трещиной проявляются литохимические ореолы (первичный и вторичный), а над послерудной они отсутствуют. Если участки развития первичных ореолов будут перекрыты дальнепринесенными рыхлыми отложениями 0,5–2 м, то вторичные литохимические ореолы рассеяния не будут выявлены, а газорудные ореолы над рудным телом проявят (IУ тип). Если первичные ореолы ртути не достигают земной поверхности, то могут образоваться значимые газорудные ореолы за счет миграции паров ртути от рудных тел и первичных ореолов, проявленных на глубине по трещинам к поверхности земли (У тип). Подобные примеры зафиксированы на полиметаллических и медноколчеданных месторождениях. На одном из медноколчеданных месторождений Урала первичные ореолы ртути не доходят до современной поверхности на 120–150 м и, несмотря на это, газорудные ореолы рассеяния в почвенном воздухе были зафиксированы над рудной залежью, находящейся на глубине 200 м. Горизонтальные и субгоризонтальные рудные тела часто сопровождаются узкими ореолами рудообразующих элементов и элементов-спутников, которые не выходят на поверхность, включая и первичные ореолы ртути. При этом за счет миграции паров ртути от месторождения к поверхности могут образоваться газорудные ореолы рассеяния в почвенном воздухе. Тогда по простиранию или вкрест простирания рудных залежей часто фиксируются разобщенные газорудные ореолы в почвенном воздухе, которые обусловлены разрозненными тектоническими системами макро- и микротрещин, по которым ртуть и ее соединения мигрируют к поверхности (VI тип). Газорудные ореолы рассеяния в почвенном воздухе могут отсутствовать или проявляться так слабо, что не могут выявляться современными техническими средствами по следующим причинам: большая глубина залегания руд и первичных ореолов, недостаточная трещиноватость и микротрещиноватость горных пород для миграции ртутного потока и развития зоны окисления. Развитие интенсивной трещиноватости в большом объеме вмещающих и перекрывающих пород может привести к значительному разубоживанию ртутного потока, идущего от месторождения. Глубинность газорудного метода при поисках слепых месторождений определяется в основном вертикальным размахом первичных ореолов ртути, который для полиметаллических месторождений может достигать 800 м [8], а для рудных – 1000 м и более [6].

Погребенные месторождения могут быть перекрыты более молодыми по отношению к оруденению кристаллическими породами. При этом газорудные ореолы рассеяния в почвенном воздухе могут формироваться за

счет ртутного потока, идущего по тектоническим трещинам к поверхности, т.е. по аналогии со слепыми месторождениями, у которых первичные ореолы не доходят до земной поверхности. Пески, супеси, суглинки, валуны и галечники являются проницаемыми для ртутного потока, как и для других газов, менее проницаемы глины. Газортутные ореолы рассеяния в почвенном воздухе интенсивностью 20-220 мкг/л при фоне 10-15 мкг/л установлены над погребенными ртутными, полиметаллическими, медными, золоторудными и оловорудными месторождениями. Интенсивность газортутных ореолов рассеяния ниже, чем для слепых месторождений, что объясняется отсутствием первичных ореолов с поверхности. Наложенные же ореолы имеют существенно более низкие концентрации ртути по сравнению с первичными.



Р и с . 5. Газортутные ореолы рассеяния над погребенными (I-III) и погребенными слепыми (IV-VI) рудными телами

I-III - первичные ореолы ртути; I, II - верхнерудные, III - нижнерудные; IV-VI - слепые рудные тела: IV, V - с выходом первичного ореола ртути на эрозионный срез, VI - слепым первичным ореолом.

Условные обозначение те же, что и на рис.3.

На рис.5 показаны ртутные ореолы над погребенными месторождениями (I-III типы). Если месторождение имеет верхнерудный срез и по вмещающим породам развивается кора выветривания, то эти условия более благоприятны по сравнению с теми, где кора выветривания отсутствует.

Развитие коры выветривания по первичному ореолу увеличивает ртутный поток к поверхности, что приводит к повышению интенсивности газортутных ореолов (I тип) относительно случая, где кора выветривания отсутствует (II тип). Над погребенным рудным телом, имеющим нижний рудный срез, газортутные ореолы не фиксируются (III-V типы). Литохимические ореолы ртути и других элементов над погребенными рудными телами при валовом анализе в подавляющем большинстве не обнаруживаются с поверхности. В зависимости от типа перекрывающих отложений, интенсивности ртутного потока и других факторов глубинность газортутного метода при поисках погребенных рудных месторождений может изменяться от 20 до 100 м. Наиболее благоприятные условия для формирования аномальных концентраций в почве создаются, когда первичные ореолы ртути выходят под аллохтонные отложения мощностью не более 20-30 м (см. рис. 5, IV и V типы). Интенсивность газортутных ореолов может усилиться, если под аллохтонными отложениями есть древняя кора выветривания (тип У). Если первичные ореолы ртути не выходят под аллохтонные отложения, то условия формирования газортутных ореолов являются менее благоприятными (VI тип). Но и при этом газортутные ореолы формируются в почве. Примером может быть медноколчеданное месторождение на Урале, где в аналогичных условиях зафиксирован газортутный ореол. Глубинность газортутного метода при поисках погребенных слепых месторождений зависит от многих факторов, основным из которых является существование аномального ртутного потока. Вероятно, глубинность метода будет равна 200 м при мощности дальнепринесенных отложений 5-20 м. При наличии интенсивных первичных ореолов ртути, выходящих под аллохтонные отложения, глубинность метода может быть 300 м и более.

Как указывалось выше, первичные ореолы ртути пока невозможно отличить от сорбированных (наложенных) ореолов в кристаллических породах, перекрывающих месторождения. При валовом анализе коренных пород может определяться ртуть не только из первичных, но и сорбированных, квазигазообразных и окклюзированных ореолов. Часто первичные ореолы ртути над рудными телами, залегающими на глубине 100-200 м, мало контрастны. Наложённые ореолы рассеяния ртути над погребенными и погребенными слепыми месторождениями в большинстве случаев при валовом анализе ртути с поверхности не выявляются, что не позволяет использовать методику изучения наложенных ореолов ртути для поисковых работ.

В табл. 4 приведены данные по величине отношения аномального сигнала к фону, измеренные тремя способами по пробам наложенного ореола, полученным в результате вышеописанных экспериментов. Под первым способом понимается определение валовых концентраций ртути атомно-абсорбционным методом, технология второго и третьего метода здесь не раскрывается. Сравнительные данные свидетельствуют о преимуществе третьего метода, при котором наложенные ореолы рассеяния ртути наиболее

Таблица 4

Результаты измерений наложенных ореолов рассеяния ртути, образованных за счет сорбции паров ртути при изменении времени действия ртутного источника

Интервал глубины отбора проб, см	Величина отношения аномального сигнала к фону			Основные данные эксперимента
	1-й способ	2-й способ	3-й способ	
1	2	3	4	5
Первый эксперимент				
0-1	1,5	1	2,5	Непрокаленный
1-2	1,6	1	2,4	кварцевый песок,
2-3	1,3	1	1,2	формирование 4ч.
3-4	1,4	1	2,6	Температура 17°C,
4-5	1,1	1	3,4	пористость 32%.
5-6	1,2	2	2,6	25.II.87 г.
6-7	1,2	1	3,1	
7-8	1,1	5	3,0	
8-9	1,3	2	3,4	
9-10	1,3	10	7,2	
Второй эксперимент				
0-1	2,2	4	22	Непрокаленный
1-2	1,5	5	10	кварцевый песок,
2-3	1,4	4	7	формирование 16ч.
3-4	1,6	2	11	Температура 17°C,
4-5	1,7	2	16	пористость 34%.
5-6	2,1	2	15	26-27.II.87 г.
6-7	1,5	3	9	
7-8	1,6	3	8	
8-9	1,9	1	8	
9-10	1,7	1	7	
Третий эксперимент				
0-1	1,2	7,3	6,7	Непрокаленный
1-2	1,8	5,5	4,8	кварцевый песок,
2-3	2,9	5,0	8	формирование 24 ч.
3-4	2,3	3,4	10	Температура 17°C,
4-5	2	4,0	11,4	пористость 36%.
5-6	2,3	7,0	12,8	14-15.7.87 г.
6-7	4,4	12,5	18,4	
7-8	3,6	14	65,5	
8-9	4,4	14	61	
9-10	4,9	15	80	
Четвертый эксперимент				
0-1	1	1	1	Непрокаленная

Продолжение табл.4

Интервал глубины отбора проб, см	Величина отношения аномального сигнала к фону			Основные данные эксперимента
	I-й способ	2-й способ	3-й способ	
I	2	3	4	5
1-2	I	I	1,5	сухая неуплотненная глина, формирование 672 ч. (28 сут). Температура 16-20°C, пористость 32%. 5.II-3.I2.87 г.
2-3	I	I	2	
3-4	I,2	I	2,7	
4-5	I,5	I	7,5	
5-6	I,8	3	8,4	
6-7	I,9	3	10,5	
7-8	2,7	I	6,2	
8-9	3,6	I	8,4	
9-10	3,5	8	3,5	
Пятый эксперимент				
0-1	4,1	9,2	11,6	Прокаленный кварцевый песок, формирование 768 ч.(32 сут.) Температура 18-24°C, пористость 34%. 2I.5-23.6.87 г.
1-2	4,6	17,5	19,7	
2-3	4,5	9	19,4	
3-4	5,1	16,4	23,5	
4-5	6,3	24,2	22,6	
5-6	6,9	12,2	24,1	
6-7	9,7	22,4	16,4	
7-8	10,1	20,4	37,8	
8-9	13,6	17,4	20,8	
9-10	15,7	24	35,4	
Шестой эксперимент				
0-1	14,3	I	35	Прокаленный кварцевый песок, формирование 2265 ч.(94,4 сут). Температура 18-21°C, пористость 36%. 29.6-I.I0.87 г. Измерения проводились спустя 25 дней после отключения источника
1-2	11,3	2,5	63,5	
2-3	14	5	73,5	
3-4	14,2	2	111	
4-5	16,2	I	103	
5-6	14,6	1,7	136	
6-7	18,6	6	147,5	
7-8	18,7	8,5	157,5	
8-9	20,9	7,5	131	
9-10	22,2	10	146	

контрастны. В некоторых случаях имеется преимущество второго метода над первым. Точность работ второго и третьего методов выше, чем первого. Небольшие объемы работ, выполненные по изучению первичных оре-

олов ртути на медноколчеданном месторождении, подтвердили большую эффективность второго и третьего методов исследования.

Анализ газовых и наложенных ореолов рассеяния ртути над погребенными и погребенными слепами месторождениями показывает, что в подавляющем числе случаев газовые ореолы фиксируются в почвенном воздухе, а наложенные — отсутствуют. Наложённые ореолы рассеяния ртути несомненно существуют над указанными месторождениями, но малые ее количества не могут быть выявлены среди сингенетичной (фоновой) ртути горных пород при валовом анализе содержаний ртути. Между газовыми и наложенными ореолами ртути существует неразрывная генетическая связь. Появление газового ореола ведет к рождению сорбированного ореола рассеяния, и наоборот. Отдельное существование их в горных породах нам трудно представить. При отборе почвенного воздуха из шпуров или шнековых зондов в объеме газовой пробы всегда имеются пары ртути, занимавшие поры и макропоры почв, а также десорбированная ртуть, рожденная при пробивке шпуров ломом, вращении шнекового зонда и прокачке почвенного воздуха. При этом пары ртути пор и пары, полученные при десорбции, невозможно разделить. Поэтому аномальные концентрации ртути, легко извлекаемые из почвы путем небольшого разрежения, создаваемого насосом, получили в отличие от квазигазообразных и окклюдированных газортутных ореолов название "свободные газортутные ореолы рассеяния в почвенном воздухе". Пары ртути из квазигазообразных и окклюдированных ореолов трудно извлекать. Для этого необходимо разработать сложную технологию их извлечения.

Газортутные методы по почвенному воздуху, как показал опыт работ, могут в некоторых случаях успешно решать поисковые задачи. На открытых участках газортутным методом могут оперативно оконтуриваться рудные тела и рудные зоны, перекрытые эквивалентно-делювиальными образованиями и пролювиальными отложениями. К примеру, в Таджикистане газортутным методом выявлены 12 рудных тел с промышленным содержанием ртути [1]. В одном из районов выявлена золоторудная залежь, погребенная рыхлыми дальнепринесенными отложениями мощностью 120—130 м.

По данным Э.Г.Харатьяна, при проверке подземными горными работами газортутной аномалии, выявленной на флангах медноколчеданного месторождения Кафан (Армения), было обнаружено слепое промышленное рудное тело, залегающее на глубине 30 м. На Урале в зоне газортутной аномалии последующими буровыми работами выявлена погребенная слепая промышленная медноколчеданная залежь на глубине 350 м [9]. В Китае в зоне газортутной аномалии выявлено погребенное слепое медноскарновое промышленное рудное тело, залегающее на глубине 400 м. [10]. В Таджикистане при проверке газортутной аномалии на флангах известного месторождения была выявлена новая рудная зона, погребенная дальнепринесенными отложениями мощностью 80—100 м. В этой зоне установлены промышленные содержания олова.

Совершенствование известных и разработка новых методических приемов с использованием высокочувствительных и высокоточных ртутных газоанализаторов, использующих эффект Зеемана с золотыми сорбентами, позволит существенно повысить поисковые возможности ртутных методов поисков.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бриггянский А.А., Дзайяков А.Б., Дьяков Ю.А. и др. Результаты газортутных поисков в Таджикистане. //Геохимические методы поисков глубокозалегающих рудных месторождений. Новосибирск: Наука, 1980. С.148-155.
2. Методические рекомендации по газортутному методу поисков рудных месторождений. М.: ИМПРЭ, 1985. 123 с.
3. Озерова Н.А. Ртуть и эндогенное рудообразование. М.:Наука, 1986. 230 с.
4. Сауков А.А. Геохимия. М.: Наука, 1966. 485 с.
5. Соловов А.П. Геохимические методы поисков месторождений полезных ископаемых: Учебн.для вузов. М.:Недра,1985. 294 с.
6. Федорчук В.П. Промышленные типы ртутных месторождений. //Сов.геология. 1974. № 8. С.3-9.
7. Фурсов В.З. Ртуть - индикатор при геохимических поисках рудных месторождений. М.: Недра, 1977. 142 с.
8. Фурсов В.З. Газортутный метод поисков месторождений полезных ископаемых. М.: Наука, 1983, 240 с.
9. Шорохов Г.П., Вострокнутов Г.А. Газортутные поиски глубокозалегающих медноколчеданных месторождений на Урале //Геохимические методы поисков глубокозалегающих рудных месторождений. Новосибирск: Наука, 1980. С.169-175.
- Ю. Zonghua W., Janfen A. Mercury vapor survey in an area of thick transported overburden near Shanghai, China // J.Geochem. Explor. 1981. Vol. 15, N 13. P. 77-92.

УДК 550.847

Н.А.Озерова, Н.Р.Машьянов  
НОВОЕ В РТУТОМЕТРИИ

С именем А.П.Соловова связано создание геохимических методов поисков рудных месторождений в СССР. Он вместе с Н.И.Сафроновым относится к числу первооткрывателей этого направления науки и практики. Как известно, ртутнометрический метод - его теоретические основы и практические приложения - введены в теорию и практику геохимических поисков А.А.Сауковым [10]. А.П.Соловов - один из тех, кто в числе первых оценил значение ртутнометрического метода поисков и всячески содействовал его развитию.

Под руководством А.П.Соловова в 50-е годы В.В.Фурсовым проводилось изучение ртутных ореолов на свинцово-цинковом месторождении Ачисай в Казахстане [15].

Впоследствии ртутнометрический метод совершенствовался и использовался в практике поисковых работ с весьма высокой эффективностью. Этот метод получил широкое признание как в СССР, так и за рубежом. Это нашло отражение в регистрации в Госкомизобретений СССР открытия [11], практическим следствием которого явилась поисковая ртутнометрия.

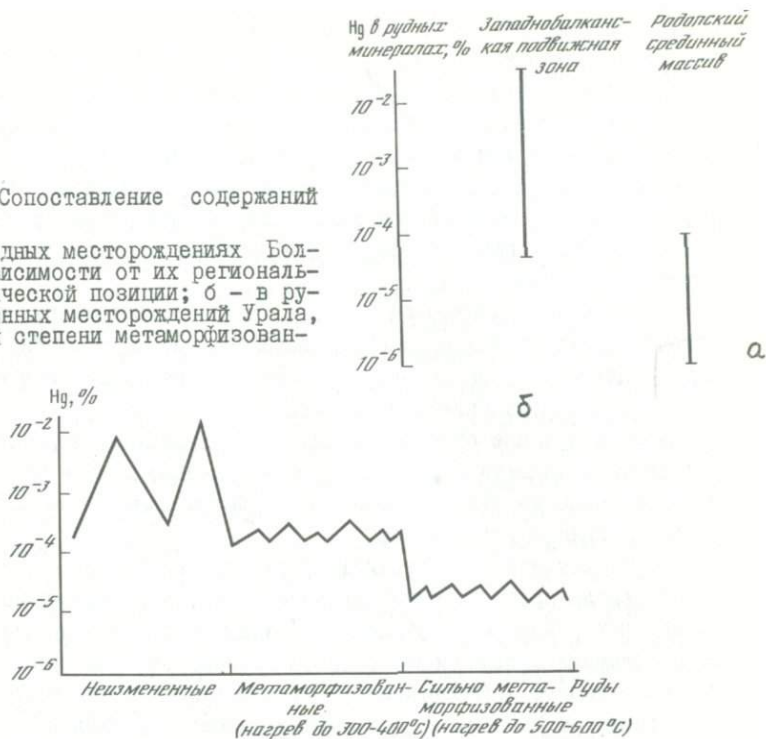
Сначала метод развивался в литохимическом варианте (по коренным породам и наносам), впоследствии появился газортутный вариант; последний известен в двух модификациях – по почвенному воздуху и по приземной атмосфере, каждая из методик – литохимическая и газортутная – имеет свои достоинства, и оба метода следует проводить в комплексе. Из двух газортутных методов более юная вторая модификация (опробование по приземной атмосфере), развитие которой заметно прогрессирует с развитием техники измерений. В последние годы в Ленинградском университете разработаны методика и аппаратура для прямых (без отбора проб) селективных определений содержаний ртути в атмосферном воздухе, что позволило изучать поля концентраций ртути в условиях ее естественного распределения в приземной атмосфере [1,13]. Установка такой аппаратуры на различные типы носителей (вертолет, автомашина, морское судно и др.) позволяет, помимо детальных наземных работ, вести и мелкомасштабные исследования с получением геохимической информации в реальном времени.

Мы не будем подробно останавливаться на рассмотрении ртутнометрического метода поисков, он широко отражен в многочисленных публикациях целой армии исследователей. Основное внимание нами уделено теоретическим разработкам, имеющим важное значение для дальнейшего совершенствования метода, а также принципиально новым аспектам приложения этого метода.

Установлено [6], что ртутоносность рудных месторождений определяется в первую очередь регионально-тектоническими условиями их размещения – в пределах либо линейных подвижных зон (линеamentных структур), либо стабильных блоков – срединных массивов и областей древней консолидации. Содержания ртути в рудах и слагающих их минералах соответственно различны для месторождений из этих двух геологических позиций: в первой они на 1–2 и более порядков выше, чем для второй (см., например, рис.1). Это обусловлено различной проницаемостью геологических структур в период рудоотложения для ртутьсодержащих мантийных эманаций, определяющих степень обогащения руд ртутью. Следует, кроме того, отметить, что рудные месторождения, формирующиеся в связи с гранитоидным коровым магматизмом, даже в пределах линеamentных структур характеризуются сравнительно низким уровнем концентрации ртути. Эти региональные особенности в распределении ртути в рудных

Р и с . I. Сопоставление содержаний ртути

а - в рудных месторождениях Болгарии в зависимости от их региональной геологической позиции; б - в рудах колчеданных месторождений Урала, в различной степени метаморфизованных



месторождениях четко отражаются - при прочих равных условиях - на развитии литохимических ртутных ореолов вокруг этих месторождений. Месторождения, приуроченные к зонам глубинных разломов, проникающих глубоко в мантию, будут характеризоваться ореолами с заметно более высокими концентрациями ртути ( $n \cdot 10^{-6}$  и  $n \cdot 10^{-4}\%$ ) Hg чем месторождения в стабильных блоках, обязанные своим образованием внутрикоробным процессам. Соответственно ртутные аномалии только в миллионные доли процента, которые в пределах линейных зон бесперспективны, в стабильных блоках являются показателями, возможно промышленного оруденения, и площади этих аномалий рекомендуются для детализации работ.

На территории, перспективной по геологическим предпосылкам на сульфидсодержащее оруденение, где планируется постановка ртутметрической съемки, рекомендуется предварительно проанализировать геологическое строение региона и выделить стабильные участки - срединные массивы и области древней консолидации - в отдельную группу для последующей оценки их перспективности. При этом следует обратить внимание на проявление процессов тектоно-магматической активизации на стабильных блоках, а в случае необходимости провести необходимый комплекс исследований на наличие или отсутствие проявлений этих процес-

сов, поскольку на ранних геологических картах зоны тектоно-магматической активизации не нашли своего отражения (эта категория структур была впервые выделена А.Д.Шегловым в 60-е годы). Если такие процессы будут установлены на отдельных участках стабильных блоков, то эти участки следует включать как составные части в линейные зоны тектоно-магматической активизации (проявленные значительно более широко), и в этом случае активизированные участки стабильных блоков будут характеризоваться всеми особенностями ртутных ореолов, характерных для линейных подвижных зон.

Различия литохимических ореолов ртути соответственно для месторождений, приуроченных к линейным подвижным зонам и стабильным массивам, отражаются и на газортутных ореолах (по почвенному воздуху), конечно, при прочих равных условиях.

На этом примере отчетливо видно, как развитие теоретических представлений в области геохимии ртути — в данном случае концепции ртутной дегазации из мантии Земли — приводит к конкретным практическим рекомендациям в ртутотрии.

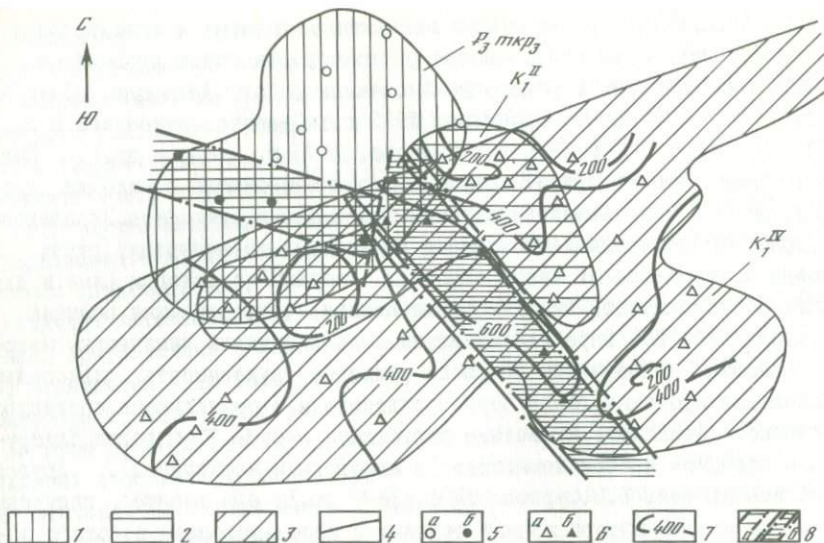
Другое достижение в геохимии ртути последних лет — установление новой закономерности, заключающейся в том, что ртутносность гидротермальных рудных месторождений вследствие высокой летучести ртути и ее соединений существенным образом зависит от интенсивности проявления пострудного метаморфизма [6], который, как известно, сопровождается тепловым прогревом. Это влияние заметно проявляется при наложении метаморфизма, соответствующего высокой степени зеленосланцевой фации (300–400°C), и особенно резко — при метаморфизме амфиболитовой фации (500–600°C) (рис.2). Кроме того, пострудный метаморфизм сказывается на снижении содержания ртути в ее литохимических ореолах и особенно заметно на сокращении их размеров. Если для неметаморфизованных и слабометаморфизованных рудных месторождений они распространяются на сотни метров, иногда до километра и более, то для сильнометаморфизованных рудных месторождений они более локальны за счет возгонки летучих форм ртути на флангах месторождений и составляют первые сотни-десятки метров, а иногда лишь несколько метров.

Соответственно в районах, претерпевших сильный пострудный метаморфизм, локальные литохимические ореолы ртути являются не проявлением лишь слабой минерализации, как это имеет место в областях, где пострудный метаморфизм неизвестен или проявлен слабо, а показателем, возможно, промышленного оруденения и заслуживают детального исследования с постановкой в этих районах других видов геохимических поисков и геологических исследований [8].

Сокращение размеров литохимических ореолов ртути при метаморфизме отражается на ее газовых ореолах. Такие примеры известны в Швеции, Финляндии, Австралии, Забайкалье и других регионах (исследования проводились по почвенному воздуху).

В последние 20–25 лет установлена новая закономерность в геохимии ртути – парагенезис ртути и углеводородов в газовых и газонефтяных месторождениях. Наши исследования ртутиносности газов проводятся с 1963 г. Они изложены в ряде опубликованных работ (Айшинян, Озерова и др., 1970 г.; Озерова, Груздева, 1972 г.; Озерова, пиковский и др., 1974 г.; 1981 г., [7], 1985 г.; Озерова, 1975 г., [6]; и др.). Было установлено, что содержания ртути в газах изменяются в широких пределах, но они в большинстве случаев выше, чем в атмосфере. Определены факторы, обуславливающие появление повышенных концентраций ртути в газовых и газонефтяных месторождениях, главным из которых (как и для рудных месторождений) оказалась регионально–тектоническая позиция месторождений. Все определения ртути были выполнены химическим методом, основным недостатком которого является трудоемкость измерения (длительная прокачка газов через поглотитель и последующая процедура химического анализа). Известные зарубежные работы 70-х годов базируются в принципе на том же методе (с некоторыми вариациями). Другой метод использовал В.З.Фурсов (1971, 1977 гг.); его данные получены с помощью атомно–абсорбционной техники с использованием золотого сорбента. Несмотря на большую экспрессность анализа, метод не лишен недостатков. Как показали опыты, углеводородные газы, в отличие от воздуха, – "неблагодарный" объект для анализа этим методом: известны случаи, когда золотой сорбент мог поглощать лишь часть ртути, содержащейся в углеводородных газах.

Разработанная в последние годы в ДГУ атомно–абсорбционная аппаратура [1, 13] обладает селективностью на ртуть и чувствительностью, достаточной для прямых определений ртути в углеводородных газах практически любого состава (укажем, что неселективное поглощение излучения достигало иногда десятка процентов). Это позволило развернуть систематические исследования ртутиносности газовых и газонефтяных месторождений на территории Советского Союза. В качестве примера приведем карту опробования на ртуть углеводородных газов Мирненского месторождения на Северном Кавказе (рис. 2). Его высокая ртутиносность была установлена ранее [7] и, как показал анализ его геологического положения, обусловлена региональной позицией месторождения – в узле пересечения продольных разломов, расположенных на южном фланге Манычских дислокаций, и субмеридиональных, принадлежащих Транскавказскому поперечному линеamentу. Детальное опробование по скважинам позволило выявить интересные особенности в распределении ртути в углеводородных газах этого месторождения. Во-первых, четко наблюдается увеличение содержания ртути с глубиной: если в газах верхнепалеогеновых отложений содержание ртути составляет  $5 \cdot 10^{-8}$ – $1,8 \cdot 10^{-7}$  г/м<sup>3</sup>, то в газах меловых отложений (залегающих глубже на 2000 м) оно заметно повышается:  $2 \cdot 10^{-7}$ – $3,9 \cdot 10^{-5}$  г/м<sup>3</sup>. Во вторых, отмечается четкая корреляция содержаний ртути с углекислым газом: для газов верхнепалеогено-



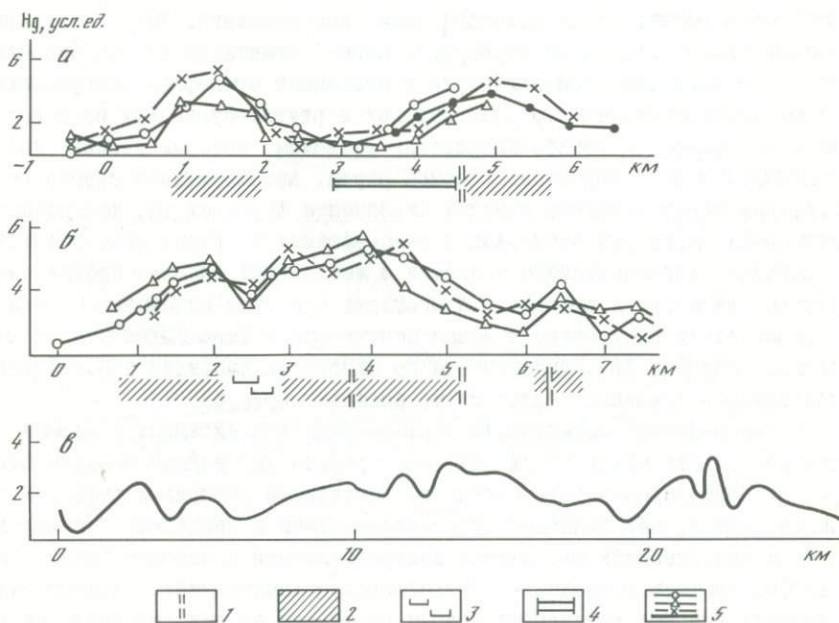
Р и с . 2. Схема ртутоносности газовых залежей Мирненского газоконденсатного месторождения, Северный Кавказ (по результатам опробования 1984 г.)

Газовые залежи: 1 - в майкопских отложениях, 2,3 - в нижнемеловых отложениях - (2 - пласт II, 3 - пласт IУ); 4 - контуры газоносных залежей; 5 - скважины майкопской залежи с содержанием ртути в газе: (а) - не обн., (б) - 1-3 усл.ед.; 6 - скважины нижнемеловых залежей с содержанием ртути в газе < 400 усл.ед. (а) и > 400 усл.ед.(б); 7 - изолинии концентрации ртути в газе нижнемеловых отложений (цифры даны в усл.ед.); 8 - зоны максимальной концентрации ртути в газах а - майкопской залежи и б - нижнемеловых отложений

вых отложений характерны низкие содержания  $CO_2$  - 0,06-0,24 об.%, а в газах меловых отложений они повышаются - 3,65-6,66 об.%. На фоне описанного распределения ртути (повышенных концентраций в меловых отложениях и пониженных - палеогеновых) выделяется линейная зона с аномально повышенными содержаниями в меловых отложениях, заметно превышающими содержания ртути в других скважинах, вскрывающих эти отложения. Далее на северо-восток, где меловые породы отсутствуют, в области палеогеновых отложений эта зона также прослеживается, лишь несколько меняя свое простирание (по-видимому, со смещением по нарушению) Содержания ртути здесь конечно ниже, чем в той же зоне в пределах меловых отложений, но они четко выделяются на фоне еще более низких содержаний ртути в газах палеогеновых отложений. Таким образом, вырисовывается линейная проницаемая зона, отвечающая седловине между куполовидными поднятиями продуктивного пласта, но на геологической карте месторождения не зафиксированная. В то же время, рассмотрение полученных данных вкпе с региональными геологическими материалами позволило установить, что выявленная нами зона повышенной проницаемос-

ти хорошо вписывается в структуру регионального разлома северо-западного простирания.

Повышенные концентрации ртути в газовых эманациях газовых и газонефтяных месторождений (на 3-4 порядка превышающие атмосферные), а также вдоль зон, дренирующих газо- и нефтегазоносные залежи, рассматриваются как предпосылки применения ртутметрии при поисках этих месторождений [4,6,7]. Такие опыты известны, но весьма малочисленны (В.З.Фурсов, наши данные). Не вдаваясь в их обсуждение, мы бы хотели подчеркнуть, что ртутные ореолы на газовых и газонефтяных месторождениях должны иметь другую морфологию, чем на рудных месторождениях. Ртутные аномалии будут проявляться в основном по зонам разломов, оконтуривающих газовую залежь (или антиклинальную ловушку) и дренирующих ее, а над самой газовой залежью, если она находится в ненарушенном залегании и не разбита сетью тектонических нарушений, будут пониженные содержания ртути. Тому наглядный пример - ртутные ореолы в приземной атмосфере на нефтегазоносных площадях Удмуртии, Башкирии [4] и Северного Кавказа (рис.3).



Р и с . 3. Графики распределения ртути в приземной атмосфере и нефтегазоносных провинциях Башкирии (а,б) и Северного Кавказа(в)

а - над антиклинальной структурой с нефтяной залежью (Воскресенское месторождение); б,в - над структурами, разбитыми тектоническими нарушениями и не содержащими нефти; б - Таушская структура, в - Арзигитский район

1 - разломы, установленные по сейсмическим данным; 2 - зоны повышенной проницаемости по данным газортутной съемки; 3 - выход на поверхность соляного пласта (Р); 4 - местоположение нефтяной залежи; 5 - графики содержания ртути в атмосферном воздухе(в разные дни)

При исследовании ртутоносности углеводородных газов мы до настоящего времени анализировали лишь атомарную ртуть, отдавая себе отчет, что часть информации мы теряем, не определяя ртутьорганические соединения. Измерений такого рода не было, однако работы последних лет с использованием дифференциальных атомно-абсорбционных методик обнадёживают и позволяют полагать, что доля ртутьорганических соединений в углеводородных газах будет значительной; определения, выполненные на одном из месторождений Северного Кавказа, показывают, что количество ртути, связанной с ртутьорганическими соединениями, составляет до 20–30% от валового ее содержания. В этой связи заслуживает внимания изучение газовых ореолов не только атомарной ртути, но и ртутьорганических комплексов.

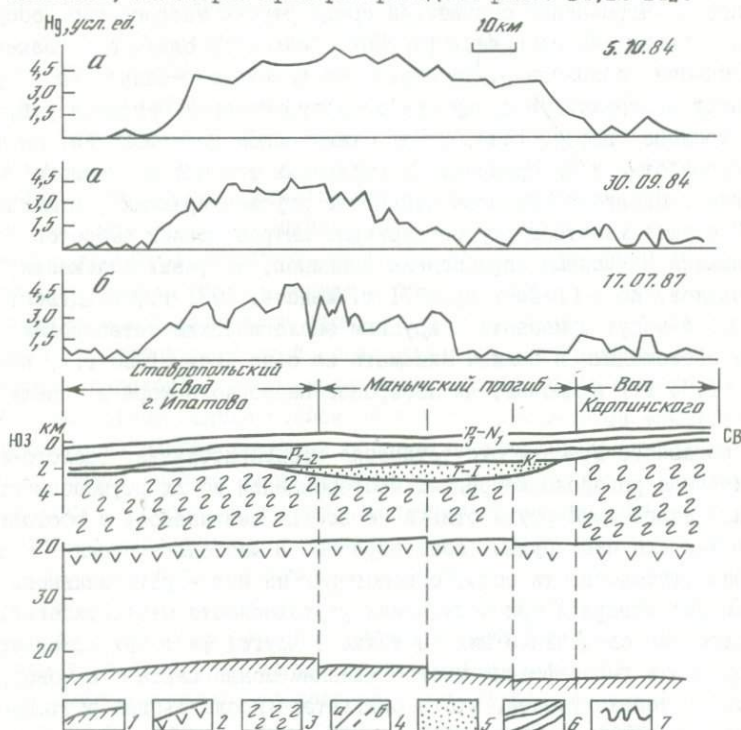
В практике региональных поисковых работ важное значение имеют выявление и картирование зон тектонических нарушений, контролирующих размещение рудных и газонефтяных месторождений. Из ртутных методов ранее для этой цели использовались литохимические методы и изучение почвенного воздуха ([5], В.З.Фурсов и др.). Дистанционные методы облегчают и расширяют возможности таких исследований. Так, в результате автомобильной съемки на территории Южно-Ферганского ртутно-сурьмяного пояса выявлены аномалии ртути в приземной атмосфере над разломами, определяющими размещение ряда ртутных и ртутно-сурьмяных месторождений, например над Северо-Катранским разломом, который ранее хорошо выделялся в поле первичных ореолов ртути. Автомобильная съемка по профилям через активные участки линеамента Карпинского, контролирующего размещение ртутьсодержащих газонефтяных и рудных месторождений, в районах Ставропольского поднятия и Мангышлака выявила протяженные ртутные аномалии в приземной атмосфере; при этом максимальные концентрации ртути приурочены к зонам Маньчского и Южно-Каратауского глубинных разломов [6]. Пересечение по одному из профилей через 3 года повторило в основных чертах ту же аномалию (рис.4).

Новым является возможность картирования зон активных разломов на дне водных бассейнов по газортутным ореолам над водной поверхностью [2,3]. Такие ореолы устанавлены над активными разломами рифтовой зоны оз.Байкал, над тектоническими нарушениями в пределах шельфовой зоны и континентального склона северо-западной акватории Тихого океана (по профилю г.Анадырь-г.Петропавловск-Камчатский). Следует также отметить впервые выявленные ореолы ртути над зонами подводной гидротермальной активности и залежь газогидратов на дне Охотского моря в пределах Курильской островной дуги.

Эти материалы, а также известные ранее данные о ртутоносности океанических линеаментов (данные по Срединно-Атлантическому хребту и Восточно-Тихоокеанскому поднятию), о наличии ртутных ореолов вокруг металдоносных осадков на дне Красного моря и повышенных содержаниях ртути в марганцевых конкрециях срединно-океанических хребтов позволяют считать перспективным использование ртути при исследовании

ях водных бассейнов (озер, морей и океанов) – для прослеживания активных тектонических зон, выявления рудных скоплений, подводных действующих вулканов и участков современной гидротермальной деятельности на дне водных бассейнов. Это направление – новое в ртутметрии и требует быстрого развертывания методических работ.

В ближайшее время дальнейшее развитие будут иметь аэрогеохимические ртутметрические исследования. Положительные результаты, полученные при площадной аэросъемке масштаба 1:50 000 на рудных месторождениях Северо-Востока СССР и Средней Азии, показали принципиальную возможность выделения на основании данных аэртутных работ перспективных участков для наземной съемки масштаба 1:10 000–1:5 000. Комплекс крупномасштабных наземных исследований должен включать в качестве опережающего метода дистанционную газртутную съемку. Положительные результаты таких работ, проведенных на рудных месторождениях различного состава в самых разных ландшафтно-геохимических условиях, достаточно известны; некоторые примеры приведены ранее [4, I2–I4].



Р и с . 4. Графики распределения ртути в приземной атмосфере через Маньчжунскую систему дислокаций

1 – поверхность Мохоровича (М); 2 – поверхность Конрада (К); 3 – складчатый фундамент; 4 – зоны глубинных разломов: а – установленные, б – предполагаемые; 5 – триасовые и юрские отложения; 6 – меловые, палеогеновые и неогеновые отложения; 7 – графики распределения ртути по результатам ртутметрического профилирования в 1984 г. (а) и 1987 г. (б)

Дистанционный газортутный метод будет полезен и при изучении полей современной гидротермальной деятельности. Опыт проведения газортутных исследований в пределах вулканотектонической кальдеры Узон в пешеходном варианте и с использованием дельтаплана показал информативность полученных данных для картирования зон повышенной проницаемости.

Этот метод безусловно много даст для прогноза землетрясений и вулканических извержений. Предпосылки тому есть, но здесь еще предстоит большая работа и по созданию аппаратуры, и по разработке методик; в итоге должны быть поставлены стационарные круглогодичные исследования по сети опорных пунктов в районах сейсмической и вулканической деятельности.

Мы не останавливаемся здесь на комплексировании ртутотометрии с другими методами, но оно обязательно и предусматривает использование ртутотометрии в сочетании с другими геохимическими, геофизическими и геологическими методами.

Вопросы загрязнения окружающей среды ртутью многократно обсуждались в печати и на различных форумах и являются одним из важнейших экологических аспектов ртутотометрии. Значительные количества ртути поступают в окружающую среду при металлургическом переделе руд, сжигании топлива (нефти, газа, угля), химическом производстве, а также при переработке и захоронении промышленных отходов и бытового мусора, использовании в сельском хозяйстве ртутьсодержащих фунгицидов и т.д. Растущие масштабы ртутьсодержащих антропогенных выбросов прослеживаются по данным опробования ледников, торфяных отложений, донных осадков, почв (Вайс и др. 1971 г., Мадсон, 1981 г., Линдгвист, 1985 г.) и могут приводить к крупным экологическим катастрофам, подобным происшедшим в заливе Минамата на о-ве Кюсю (1953 г.), на о-ве Хонсю (1964 г.) в Японии, на побережье Карибского моря в Венесуэле (1982 г.) и т.д.

До недавнего времени отсутствовала предварительная геолого-минералогическая разведка рудных месторождений по их ртутоносности, и сопутное извлечение ртути отнюдь не всегда связывалось с обогащением ртутью тех или иных рудных концентратов. В настоящее время такие критерии ртутоносности есть; о некоторых из них — регионального плана — мы уже говорили при обсуждении ртутоносности месторождений. Более подробные сведения о них, а также о других факторах применительно к рудным и газонефтяным месторождениям можно найти в монографии [6]. Здесь только укажем, что в результате исследования ртутоносности более чем 3000 мономинеральных проб рудных месторождений с применением современных физических и химических методов нами выделены минералы — концентраты ртути, среди которых наиболее заметно концентрируют ртуть сфалерит, блеклая руда и самородное золото. Их развитие в пределах месторождения (локальный фактор) определяют ртутоносность руд и рудных концентратов в различных по составу месторождениях.

При оценке возможной ртутоносности рудных месторождений какой-либо провинции и предварительном выделении ртутоносных рудных месторождений для попутного извлечения из них ртути следует проанализировать геологическую обстановку рассматриваемой рудной провинции и выделить месторождения, приуроченные к структурам линейных подвижных поясов, а в их пределах – рудные месторождения с отсутствием попутного метаморфизма или слабым его развитием. Далее устанавливают в них наличие минералов – концентраторов ртути, затем среди них выделяют минералы, определяющие промышленный тип месторождения. Последующее опробование на ртуть ведут по отдельным минералам–концентраторам и типам руд с известными соотношениями минералов–концентраторов и по результатам опробования ранжируют рудные месторождения по их ртутоносности для последующего металлургического передела.

Такой анализ выполнен нами для Уральской колчеданной провинции. Это крупная линейная структура. В ее пределах расположены колчеданно–полиметаллические месторождения, претерпевшие региональный попутный метаморфизм зеленосланцевой и амфиболитовой фации (Средний Урал), и месторождения, практически неметаморфизованные или со слабым развитием метаморфизма (Южный Урал). Как следует из изложенного, для нас представляют интерес месторождения Южного Урала. Дальнейшее исследование минерального состава, выделение минералов–концентраторов и изучение в них содержания ртути показали, что ртутоносность этих месторождений определяется сфалеритом (соответственно наиболее обогащены ртутью руды со значительным содержанием цинка). И только на месторождении им. XIX партсъезда, на его северо–западном участке, где широко развита ртутоносная блеклая руда, которая наряду с халькопиритом составляет на этом месторождении медные руды (в отличие от других месторождений этой провинции, где они представлены в основном халькопиритом) ртутью значительно обогащены не только цинковые, но и медные руды. Золото относится к числу очень редко встречающихся минералов и не влияет заметным образом на уровень концентрации ртути в рудах. Такой анализ, базирующийся на установленных региональных и локальных факторах ртутоносности рудных месторождений, позволил предложить определенные рекомендации по попутной добыче ртути из ряда колчеданных месторождений Южного Урала.

Проблема охраны окружающей среды, как следует из изложенного, тесно сопрягается с проблемой попутной добычи ртути в целях комплексного использования руд, однако первая является значительно более широкой и предусматривает проведение сопутствующих мероприятий по извлечению ртути даже в тех случаях, когда это не представляет практической ценности, но ведет к ртутному загрязнению среды.

В последние годы определились новые виды минерального сырья для попутной добычи ртути, имеющие при этом исключительно важное значение для охраны окружающей среды. Это газовые и газонефтяные месторождения, некоторые из которых заключают значительные запасы ртути [6,

7]. Попутное извлечение ртути и очистка газов весьма важны в целях охраны окружающей среды даже в тех случаях, когда ртуть не является промышленно важным компонентом месторождения. Необходимо учитывать те огромные количества газа, которые ежегодно перерабатываются в мире (более  $1,7$  трлн  $m^3$  в промышленно развитых капиталистических и развивающихся странах, по данным 1987 г.). Мы не будем обсуждать другие источники поступления ртути в биосферу при переработке других видов промышленного сырья, укажем лишь, что, по оценкам американских исследователей, основная часть ртути — более половины — поступает в атмосферу за счет сжигания различного вида топлива. Поэтому знание о распределении ртути в углеводородах и о формах нахождения в них ртути приобретает первоочередной интерес.

Нельзя не сказать также и о наших данных по ртутоносности продуктов современной вулканической и гидротермальной деятельности в экологическом аспекте. Выделения значительных количеств ртути во время извержений и в последующий постэруптивный период должны учитываться в районах с достаточно плотным населением с точки зрения оценки качества среды обитания. Кроме того, должен быть обеспечен санитарный контроль на ртуть при проектировании геотермальных станций и парниковых хозяйств с использованием природного тепла современных гидротерм [9].

В представленной статье не удалось осветить все возможные области приложения ртутометрии, мы остановились только на главных из них.

Авторы с глубоким уважением посвящают настоящую работу Александру Петровичу Соловову, рассматривая ее как небольшой вклад в теорию и практику геохимических методов поисков — того направления в геологической науке, одним из создателей которого он является и развитию которого посвятил всю свою жизнь.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Г а н е е в А.А., Т у р к и н Ю.И. Селективный атомно-абсорбционный анализатор на основе спектрально-фазовых эффектов. // Журн. прикл. спектроскопии. 1984. Т.41, Вып.4. С.549-552.
2. Г а н е е в А.А., М а ш ь я н о в Н.Р., С в е ш н и к о в Г.Б., Ш о л у п о в С.Е. О возможности картирования активных тектонических структур по газовым ореолам ртути над морской поверхностью // Докл. АН СССР. 1984. Т.275, № 5. С.1162-1164.
3. И л ь и н Ю.Т., М а ш ь я н о в Н.Р., С в е ш н и к о в Г.Б. и др. Опыт применения газортутной съемки на акватории Байкал. // Вестн. ЛГУ. Сер.7. 1987. Вып.1, № 7. С.78-81.
4. М а ш ь я н о в Н.Р. Опыт экспериментальной разработки метода поисков месторождений полезных ископаемых по газовым ореолам ртути в атмосфере. // Там же. 1980. Вып.00, № 12. С.47-55.

5. О з е р о в а Н.А. О повышенных содержаниях ртути в зонах разломов некоторых сульфидных месторождений. //Геология руд. месторождений. 1960. № 3. С.85-95.
6. О з е р о в а Н.А. Ртуть и эндогенное рудообразование. М.:Наука, 1986. 230 с.
7. О з е р о в а Н.А., П и к о в с к и й Ю.И. Ртуть в углеводородных газах. //Геохимия процессов рудообразования. М.:Наука, 1982. С.102-136.
8. О з е р о в а Н.А., Ф е д о р ч у к В.П. А.с.1143213 (СССР). Способ поисков гидротермального сульфидсодержащего оруденения. //Опубл. в Б.И., 1984, № 50.
9. О з е р о в а Н.А., Ш и к и н а Н.Д., Б о р и с о в М.В. и др. Ртуть в современном гидротермальном процессе. //Современные гидротермы и минералообразование. М.: Наука, 1988. С.34-49.
10. С а у к о в А.А. Геохимия ртути. М.: 1946. 128 с. (Тр.ИГН АН СССР; Вып.74).
11. С а у к о в А.А., О з е р о в а Н.А., Ф е д о р ч у к В.П. и др. К диплому об открытии № 279 (СССР). Закономерность распределения ртути в лито- и атмосфере. //Опубл. в Б.И. 1984. № 7. С.3.
12. С в е ш н и к о в Г.Б., М а ш ь я н о в Н.Р. Применение газортутной съемки при поисках рудных месторождений в северных районах Сибири. // Геохимические методы поисков в северных районах Сибири. Новосибирск: Наука, 1984. С.150-153.
13. С в е ш н и к о в Г.Б., Т у р к и н Ю.И., А л ь т м а н и др. Аппаратура для дистанционного атомно-абсорбционного анализа паров ртути в атмосфере. //Геохимические методы поисков глубоководных месторождений. Новосибирск: Наука, 1980. С.195-199.
14. С в е ш н и к о в Г.Б., М а ш ь я н о в Н.Р., А ф а н а с о в Ю.А. и др. Ртутный спектрометр для аэрогеохимической съемки. //Тез. докл. на Всесоюз. конф. "Геофиз. приборостроение и метрол. обеспечение геофиз. работ." Л.: ВИТР, 1982. С.103-104.
15. С о л о в о в А.П., Ф у р с о в В.З. Поиски не выходящих на поверхность рудных тел месторождения Ачисай. //Сов. геология, 1959. № 3. С. 126-140.

УДК 550.41

Ю.С.Рысс

#### ГЕОХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ РАЗВЕДКИ, ОСНОВАННЫЕ НА ГЕОЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЯХ

О направлениях развития обычно судят, анализируя предшествующую историю предмета. В этом плане уместно вспомнить, что возникновение геохимических методов разведки, предложенных Н.И.Сафроновым, явилось реакцией на необходимость повышения глубинности геологических исследований и на неоднозначность результатов геофизических работ, позво-

ливших оторваться от дневной поверхности и изучать физические проявления тел, расположенных на глубине. Геохимические наблюдения были призваны к прямой характеристике состава объектов с сохранением по возможности глубинности геофизических исследований.

На первом этапе становления геохимических методов использовалась регистрация околорудных ореолов по одному основному элементу и чаще всего в составе одной какой-либо группы пород: в почвах, делювии, коренных породах, водах и т.д. Удовлетворительная характеристика качественного состава руд с помощью купро-, плимбо-, золотометрических и других подобных съемок одновременно выявила отсутствие количественных оценок о содержании, размерах и других параметрах источников геохимических аномалий. Кроме того, обнаружилась ограниченная глубинность геохимических исследований, особенно через перекрывающие рыхлые отложения. В качестве мер борьбы для преодоления названных недостатков начались активное использование многих химических элементов и опробование разнообразных природных образований, способных быть проводниками или концентраторами мигрирующих элементов (опробование газов, растений, донных осадков, фракций минералов и т.д.). Период расширения круга используемых элементов и опробуемых сред явился вторым этапом в становлении и развитии геохимических методов разведки. В этот второй этап чрезвычайно развилась техника геохимических исследований за счет привлечения к определению состава геохимических проб спектрального анализа.

Расширение круга элементов и сред опробования, помноженное на усовершенствованную технику анализа, привело к необычайному увеличению числа геохимических аномалий и вместе с тем сохранению неопределенности оценки их промышленного значения. Сказанное явилось стимулом для новых поисков однозначных критериев характеристики ореолов, а также избирательных способов геохимических исследований. Это знаменовало начало третьего этапа развития геохимических методов разведки. В этот период получили широкое развитие статистические методы обработки геохимических наблюдений с выявлением таких параметров, которые лучше всего отражали бы наличие промышленного оруденения; введены в практику представления о геохимических ландшафтах, нацеливающие на учет общегеографических, климатических, почвообразующих и других факторов, включая человеческую деятельность при оценке геохимических аномалий. Было привлечено учение В.И.Вернадского о формах нахождения элементов в надежде на их специфическую зависимость от протекающих процессов, в том числе рудообразовательных, чтобы о последних можно было судить по диагностирующим формам нахождения. Результаты названной работы оказались удачными в отдельных частных случаях. Однако вопрос об однозначной регистрации на глубине искомым промышленным объектам остался открытым. Вместе с тем в рассматриваемый третий период практическое значение приобрело заметное движение вперед в вопросе глубинности геохимических поисков. Выбор соответствующих

статистических параметров, введение принципа мультипликации, обеспечивающего усиление полезного сигнала, и селективное использование таких форм нахождения элементов, которые являются носителями информации о дальнейшей миграции, позволили достигнуть глубины исследования в десятки и первые сотни метров (вместо единиц), в том числе через перекрывающие глинистые рыхлые отложения и другие породы. Названная глубинность, по-видимому, не является пределом.

Анализируя историю развития геохимических методов поисков, можно видеть, что само их возникновение и дальнейшее совершенствование протекали под знаком стремления достигнуть прямой характеристики искоемых объектов. Отличительными чертами такой характеристики являются: непосредственная регистрация химических элементов, их количественная оценка и глубина (расстояние) обнаружения тел с нужным содержанием и запасами полезных компонентов. Перечисленные черты отражают свойства прямых методов поисков вообще [1,2]. Поэтому историю геохимических методов можно рассматривать как часть истории возникновения и становления прямых физико-химических методов поисков и разведки полезных ископаемых. На современном этапе для геохимических методов достигнута непосредственная регистрация состава объектов поисков и отвечающая запросам практики глубинность обнаружения объектов. Однако пока отсутствует количественная оценка их содержания и запасов. Отсюда вытекают неизбежность следующего этапа развития геохимических методов и его основная направленность на количественную характеристику состава объектов.

Чтобы определить возможности и конкретные пути решения стоящей перед геохимическими методами задачи, необходимо охарактеризовать физико-химическую суть процессов, протекающих в Земле. Как известно, горные породы представляют собой совокупность границ раздела твердых, жидких и газообразных фаз. На каждой из границ протекают процессы взаимодействия, представляющие собой обмен частицами вещества, являющимися одновременно носителями энергии, электрических зарядов и других свойств контактирующих фаз. Таким образом, на каждой из границ фаз существует обмен веществом и энергией, а также электрическими зарядами. Без внешнего влияния между перечисленными слагаемыми обмена устанавливается динамическое равновесие. Однако уже при наличии двух границ раздела каждая из них оказывается под внешним воздействием соседней, из-за чего возникает обмен веществом, энергией и зарядами на новом уровне между границами фаз. В таких условиях одна из границ служит источником и причиной дополнительных процессов на соседней границе, где образуются продукты и следствия этих процессов. Возникающие продукты и следствия, в свою очередь, становятся источником и причиной изменения установившегося динамического равновесия на каждой из границ, что вносит свои изменения в ход дополнительных процессов взаимодействия между границами.

При большом числе границ разных качеств и размеров между ними устанавливаются и протекают сложные взаимодействия на разных уровнях, приводящие к непрерывным и постоянным преобразованиям вещества и энергии с соответствующими перемещениями масс и зарядов. Некоторые из названных взаимодействий и веществ становятся причиной последующих событий, являясь одновременно следствием предшествующих явлений. В этой непрерывной цепи разворачивающихся взаимодействий вещества меняют форму своего существования, отдавая или накапливая энергию и заряды. Таким образом, протекающие внутриземные процессы по существу своему являются геоэлектрохимическими (физико-химическими). В них электрическая (физическая) или химическая стороны могут служить и средством возбуждения, и средством регистрации, создавая широкие возможности для диагностики веществ и активного вмешательства в ход естественно протекающих явлений.

Так как в любом процессе одни вещества образуются, а другие — расходятся и в реакции вступает и переходит в продукты этих реакций одна и та же совокупность элементов, то количественные отношения в спектрах форм нахождения этой совокупности после свершения процесса тесно связаны и отражают количественные отношения до начала процесса. Тем самым создается принципиальная возможность по спектрам форм нахождения элементов продуктов реакций судить о количестве исходных веществ. Кроме того, по пространственному распределению части продуктов реакций, по-видимому, можно оценить размещение и количество другой их части. Иначе говоря, существует принципиальная возможность по распространению спектров форм нахождения совокупности химических элементов во вторичных ореолах рассеяния получить представление о количествах и расположении элементов в первичном источнике, а по распространению соответствующих спектров в первичных ореолах — о количествах и размещении элементов в неизученной их части, в том числе и там, где концентрация искоемых компонентов может достигнуть промышленной, когда природа происхождения руд и ореолов одна.

Таким образом, при использовании трех множеств — распределения в некоторой области пространства (I), спектров форм нахождения (II), совокупности элементов (III) — можно рассчитывать на решение задачи о количественной характеристике состава объектов по геохимическим данным. Однако достижение такого решения представляет существенные трудности и возможно не во всех случаях. Легко представить, что наиболее благоприятными будут случаи, для которых можно указать существо протекающих процессов. Действительно, зная спектры форм нахождения элементов, вступающих в процесс, и продуктов этого процесса, можно судить о его сущности. Равным образом по реагирующим компонентам и известному процессу можно предсказать ожидаемые его продукты. То же можно сказать и о вступающих в процесс компонентах, если известны их сущность и продукты. Следовательно, знание процессов рудо- и ореолообразования заметно упростило бы решение искомой задачи.

Очевидным путем решения этой задачи является обнаружение природных закономерностей, которое само по себе может быть ценным в связи с установлением эмпирических правил и в то же время будет служить фундаментом для теоретического обобщения. Отсюда следует необходимость организации исследований по изучению объемной структуры спектров форм нахождения совокупности химических элементов, в первую очередь на месторождениях главнейших типов полезных ископаемых. Такая работа одновременно требует создания методик по определению самих форм нахождения элементов практически всей таблицы Менделеева. В последние годы разработаны методики определения форм нахождения микроколичеств свинца, меди, никеля, молибдена, золота (по 8-12 форм на каждый элемент). Исследованные структуры спектров форм перечисленных элементов обнаруживают многие важные закономерности, относящиеся к решению рассматриваемой проблемы о количественной оценке источников вторичных ореолов. Тем не менее сам круг охваченных элементов, количество и сущность определяемых форм совершенно недостаточны для решения требуемой задачи. Представляется особенно важным разработать методики определения форм нахождения железа, серы, кислорода, водорода, углерода, галогенов и других элементов, влияющих на формы нахождения полезных компонентов и на характер и масштаб протекающих явлений.

Анализ структуры форм нахождения меди, никеля и других элементов указывает на заметную роль в формировании их состава и размещении электрохимических явлений. Действительно, появление самородной меди и треворитного никеля оказывается связанным с восстановительными катодными процессами, в которых важную роль играют естественные электрические поля, обусловленные процессом восстановления кислорода до  $\text{OH}^-$  в верхних частях сульфидных залежей. Интересны взаимоотношения самородного, сульфидного и теллуридного золота. В местах развития микрогальванических пар, чему способствует повышение концентрации пирита и доступ атмосферного кислорода, доля сульфидного и теллуридного золота снижается, а доля самородного — повышается. Наоборот, снижение интенсивности работы микрогальванических пар повышает долю сульфидного и особенно теллуридного золота по сравнению с самородным. Размещение сульфидных, карбонатных, кварцевых, сульфатных и иных ассоциаций также оказывается связанным с направлением и распространением электрических токов. Вторичные минералы либо ориентируются по токовым линиям, либо перпендикулярно им, отражая встречное движение катионов и анионов и их взаимодействие в местах встречи.

Отмеченные особенности распределения некоторых форм нахождения элементов с направлением и размещением природных электрических токов позволяют ввести в анализ структуры спектров форм структуру электрического поля и известные механизмы электрической миграции веществ и минералообразования. Поэтому проблема количественной характеристики концентрированного состояния металлов на глубине, по их ореолам

рассеяния может получить более ускоренное решение, чем без учета такой связи.

Таким образом, одним из направлений дальнейшего развития геохимических методов поисков и решения задачи количественной оценки состава глубинных объектов представляется исследование возможностей распределения спектров форм нахождения совокупности химических элементов. Частным случаем в этом направлении является использование связи этих форм со структурой природных геоэлектрохимических явлений разных порядков.

Другим направлением решения рассматриваемой задачи может служить насильственное возбуждение внутриземных процессов и вовлечение в диагностику состава глубинных объектов искусственного протекания явлений. В этом плане наиболее доступны и осуществимы возбуждение и регистрация электрохимических реакций. В самом деле, задание в нужных объемах пород электрических токов требуемой структуры и интенсивности является при современном уровне техники доступным мероприятием. Тем самым можно целенаправленно возбуждать и регистрировать протекание электрохимических реакций, а их продукты в вещественной и электрической (энергетической) формах и характер хода процессов позволяют установить количество компонентов, вступающих и участвующих в реакциях. Указанный принцип был использован для создания контактного и бесконтактного способов поляризационных кривых (КСПК и БСПК) и некоторых модификаций частичного извлечения металлов (ЧИМ).

Сущность КСПК и БСПК состоит в том, что под действием электрического тока возбуждают и регистрируют в электрической форме окислительно-восстановительные электродные реакции на границах минералов с металлической связью атомов и жидкой фазой вмещающих пород. В методе КСПК источник тока присоединяют к вскрытым точкам оруденения (другие части неизвестны). При пропускании тока постепенно увеличивают его силу. Под действием тока сначала протекает первая реакция на минерале с наименьшей энергией кристаллической решетки. Накапливаемые продукты реакции препятствуют ее осуществлению, и когда скорость их возникновения станет значительно больше скорости их отвода от реагирующей поверхности, наступит явление предельной силы тока и произойдет присоединение к первой следующей реакции. Одновременно происходит изменение контактной разности потенциалов на границе оруденения с вмещающими породами, которая определяется энергией кристаллической решетки реагирующих минералов. Величины контактной разности потенциалов электрохимических реакций характеризуют участвующие в реакциях минералы. Их определение ведется по таблицам потенциалов реакций, известных для каждого минерала. Значения предельной силы тока реакций отражают количество участвующих в реакции минералов и пропорциональны размерам реагирующей поверхности рудного объекта, содержанию в нем соответствующих минералов и их общего количества (запасов). К настоящему времени разработаны две методики: опреде-

ления перечисленных параметров по значениям предельной силы тока реакций на соответствующих минералах и полевых работ, направленных на увязку рудных пересечений в скважинах или горных выработках, на выявление соседних тел, на характеристику зональности оруденения, на установление вкрапленной, прожилковой и сплошной текстуры руд и т.д. Для производства наблюдений создана станция КСПК-1, выпускаемая Мытищинским приборостроительным заводом. Опыт работ со станцией методом КСПК накоплен для многих районов (Кольский полуостров, Кавказ, Урал, Алтай, Казахстан, Узбекистан, Приморье и др.) и для разных типов рудных месторождений (медь, никель, свинец, цинк, олово и т.д.).

В методе БСПК возбуждение и регистрацию электрохимических реакций проводят без контакта с оруденением при расположении приемных и питающих электродов на поверхности Земли либо в скважинах и горных выработках. Процедура измерений БСПК заметно сложнее, чем в методе КСПК. Это обусловлено тем, что если при работах методом КСПК на реагирующей поверхности протекают однотипные катодные или анодные реакции, то при бесконтактных измерениях на той части поверхности, где в оруденение втекает ток, происходит катодные, а на той части поверхности, где он вытекает из оруденения — анодные реакции. Кроме того, при измерениях БСПК можно регистрировать только разность потенциалов реакций, но не сами потенциалы, и эта разность уменьшена за счет удаления приемных электродов от реагирующей поверхности. В этой связи наблюдения БСПК должны предусматривать разделение катодных и анодных процессов, учет величины изменений разности потенциалов реакций на разном расстоянии от реагирующих поверхностей и переход от значений разности потенциалов реакций к самим значениям этих потенциалов. Перечисленные требования удовлетворяются при измерении поляризационных кривых не в одном положении электрода сравнения, как это происходит в методе КСПК, а во многих точках, размещенных по профилям или вдоль стволов скважин на обследуемом участке. К настоящему времени разработана соответствующая методика определения из снятых поляризационных кривых БСПК значений потенциалов и предельной силы тока реакций с учетом отмеченных обстоятельств и нахождения по названным величинам минерального состава, содержания, запасов и положения рудных объектов. Достигнутая фактическая глубинность метода БСПК составляет 140 м. При современном уровне техники можно ожидать глубинности метода до 300—400 м, а с изменением технической вооруженности — глубже.

Сущность метода ЧИМ и его модификаций состоит в электрохимическом растворении минералов и извлечении продуктов растворения в виде ионов с помощью электрического тока в расставленные на исследуемой территории элементоприемники с последующим анализом состава полученных компонентов. Наиболее легко электрохимическое извлечение элементов происходит из ореолов. Оно требует небольших затрат времени (единицы и десятки часов) и незначительных энергетических затрат (единицы

и десятки киловатт-часов). Поскольку в извлечении в первую очередь участвуют растворимые подвижные формы элементов, заключающие в себе продукты их дальнейшей миграции, поскольку метод ЧИМ в ореольном варианте позволяет обнаруживать глубокозалегающие объекты под покровом перекрывающих глин и других рыхлых отложений, а также под эффузивами, сланцами и другими породами. Однако, как для всякого ореольного метода, и у ореольного варианта метода ЧИМ остается нерешенным вопрос о содержании интересующих элементов в их коренном источнике. Для решения этого вопроса необходимо обеспечить извлечение металлов непосредственно из руд с соответствующим транспортом веществ от реагирующей поверхности до элементоприемников. Такое извлечение составляет сущность метода ЧИМ в основном варианте. Его разработка пока находится в начальной стадии. В этом направлении необходимо подробно изучить законы миграции веществ вообще и под действием электрического тока в частности. Выполненные наблюдения показали возможность извлечения элементов с глубины в несколько десятков метров. Но многие проблемы глубинного электрохимического извлечения пока не разрешены.

Перечисленные поляризационные и вещественные способы активной геохимии не исчерпывают всех ее возможностей. Существуют многие варианты возбуждения и регистрации реакций, которые нуждаются в тщательном обследовании. Наряду с электрическими формами возбуждения, по-видимому, следует рассмотреть возможности других энергетических источников, например ультразвука, а также вещественных воздействий в виде направленных потоков инъецирующих растворов и газов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Волосюк Г.К., Комаров В.А., Сафронов Н.И. О прямых методах поисков и разведки рудных месторождений. //Разведка и охрана недр. 1967. № 3. С.26-29.
2. Рыс Ю.С. Развитие методов прямых поисков и разведки месторождений твердых полезных ископаемых. //Поиски месторождений твердых полезных ископаемых геофизическими методами. М.: Недра, 1979. С. 70-76.

УДК 550.849.082.85

И.С.Гольдберг

#### ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЙ МЕХАНИЗМ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ ГОРНЫХ ПОРОД

При прохождении электрического тока через горные породы в них протекают разнообразные электрохимические процессы. Одни из них проявляются в преобразовании и растворении твердой фазы, другие - в перемещении заряженных частиц в поле электрического тока. В результате этих процессов часть вещества извлекается из горных пород и накапливается в областях нахождения источников тока. При активном управлении этими процессами может быть создан направленный ток компонентов

к областям ввода электрического тока в землю и осуществлено концентрирование компонентов в этих областях. По составу накопленных продуктов и по их количеству могут быть определены вещественный состав среды, из которой элементы извлекаются, и содержание компонентов в этих средах. По скорости поступления компонентов можно судить о их распределении в исследуемом объеме, энергетическом состоянии, формах нахождения и т.д.

На этом принципе основаны методы дистанционной вещественной регистрации состава горных пород, руд [4,5,7]. К ним относится метод частичного извлечения металлов (ЧИМ).

Заложенные в методе ЧИМ возможности вещественной регистрации геологической среды могут быть реализованы при установлении функциональных связей между массами компонентов, извлеченных из геологической среды, и распределением их концентраций в среде:

$$m_{i-1,2,3\dots k} = f(C_{i-1,2,3\dots k}), \quad (I)$$

где  $m_{i-1,2,3\dots k}$  — масса  $i$  компонентов, сконцентрированных в определенных участках земной коры;  $C_{i-1,2,3\dots k}$  — концентрация этих компонентов в блоке горных пород.

Такая связь при электрохимическом способе регистрации выявляется через электрические параметры (напряженность электрического поля, сила тока) и время воздействия. Выбор этих параметров, очевидно, зависит от концентрации компонентов и их энергетического состояния (форм нахождения) в среде. Решение конкретных задач, связанных с исследованием определенных геологических объектов, требует установления граничных условий, определяющих извлечение элементов в соответствующих формах нахождения. Например, для выявления рудных объектов в блоках горных пород информация может быть получена при извлечении элементов непосредственно из руды или из окружающей ее "рудной атмосферы"<sup>1</sup> представленной син- и эпигенетическим ореолами. В различных областях рудной системы информация о рудном объекте заключена в разных формах нахождения, что и будет определять различные в электрохимическом режиме извлечения и условиях наблюдения.

В настоящей статье нами рассматривается механизм электрохимического извлечения электроподвижных форм нахождения элементов из почв на примере свинца, цинка, меди, железа, лежащего в основе ореольного варианта метода ЧИМ. Ореольный вариант метода ЧИМ предназначен для поисков глубокозалегающих месторождений по эпигенетическим ореолам рассеяния. Исследование механизма электрохимического извлечения элементов проведено с различными типами почв. Они выполнялись как в лабораторных, так и полевых условиях.

В лабораторных экспериментах исследовались количественные зависимости между массой извлеченных металлов и временем извлечения, силой электрического тока и напряженностью электрического поля. Эксперимен-

<sup>1</sup> Термин введен Н.И.Сафроновым [6].

ты выполнялись на установке, основной частью которой являлась электрохимическая ячейка, конструкция которой исключала влияние на процессы извлечения элементов продуктов электродных реакций. Техника проведения экспериментов с такой ячейкой описана ранее [2,3]. В ходе экспериментов анализировались растворы из анодных и катодных камер на широкий круг элементов, в том числе на медь, свинец, цинк, железо [2]. Динамика извлечения элементов отражалась на геоэлектрохимических годографах — зависимость количеств извлеченных металлов от времени прохождения электрического тока. Массы извлеченного металла относились к 1 г навески воздушно-сухой почвы. Пробы почв, подвергавшиеся воздействию, и контрольные пробы, через которые электрический ток не пропусклся, изучались на формы нахождения металлов [1]. Это давало возможность оценивать характер изменения форм нахождения под действием электрической энергии<sup>1</sup>.

Результаты лабораторных наблюдений по электрохимическому извлечению металлов из различных типов почв приведены на рис. 1. Основные результаты по динамике извлечения металлов из почв сводятся к следующему:

а. Скорость извлечения металлов  $V_1^m$ , которую можно определить как приращение массы  $i$  металла  $\Delta m_1$ , отнесенного к массе исходной породы  $m_1$ , в интервале времени  $\Delta t$ , меняется во времени. В зависимости от  $V_1^m$  на геоэлектрохимических годографах выделяются два структурных элемента, отличающиеся по скорости извлечения. Начальный, с низкой скоростью извлечения, и следующий за ним, где  $V_1^m$  резко возрастает.

б. Изменения скорости извлечения при одной и той же напряженности электрического поля происходят практически одновременно по меди, свинцу, цинку, железу.

в. Чем выше интенсивность электрического воздействия, тем быстрее происходит возрастание скорости извлечения.

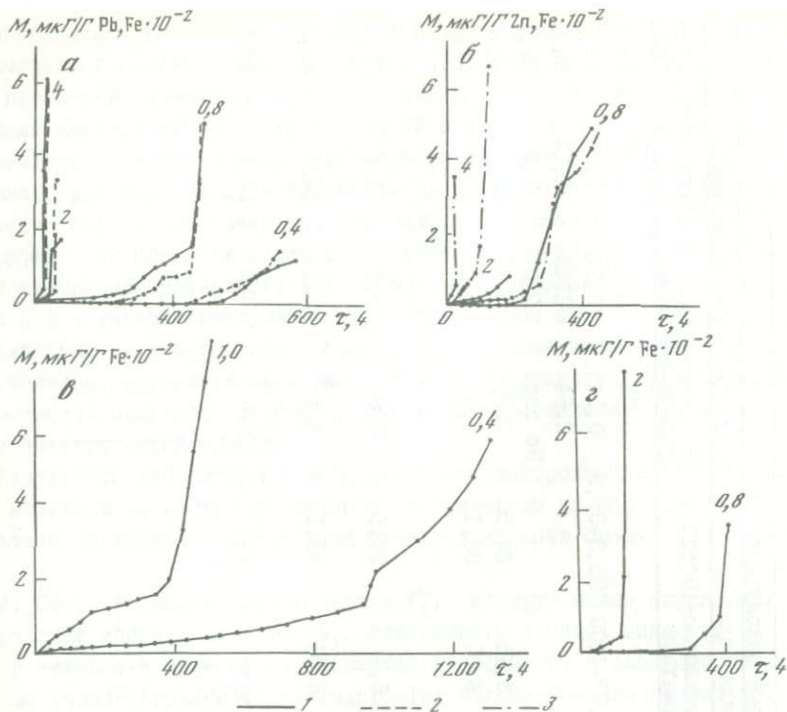
Для выяснения природы процессов, приводящих к изменению скорости извлечения металлов, рассмотрим изменение содержания форм нахождения металлов на различных интервалах геоэлектрохимических годографов.

В таблице приводятся результаты анализов по составу и содержанию в черноземной почве форм нахождения железа для времени электрического воздействия 2; 10 и 11,5 ч. В целом до 11,5 ч на интервале соответствующей начальной ветви и последующей ступени заметных изменений в содержании форм нахождения элементов не наблюдается. Несколько увеличивается через 10 ч концентрация железа в сорбированной и фульватно-гуматных формах. Резкие изменения наступают в пределах ветви при 11,5 ч (см. рис. 1, а): увеличивается содержание на два порядка воднорастворимых форм, на порядок — сорбированных форм и почти в 2 раза —

<sup>1</sup> Под электроподвижными формами нахождения элементов понимаются такие формы их нахождения, которые имеют заряд и могут перемещаться в электрическом поле.

Содержания элементов в различных формах (в %) и соотношения с его валовыми содержаниями в пробах почв

Элемент	Напря- жен- ность Е, В/см	Время, час	Форма нахождения							
			до пропускания тока				после пропускания тока			
			Водно-ра- створимая	Сорбиرو- ванная	Фульватно- гуматная	Остаток	Водно-ра- створимая	Сорбиру- ванная	Фульватно- гуматная	Оста- ток
Железо (черноземная почва)	4,0	2 10 11,5	0,02-0,08	0,03-0,04	0,87-1,09	98,5-99,9	0,05 0,04 2,64	0,06 0,14 1,25	1,10 1,80 2,14	98,8 98,0 94,0
Свинец (черноземная почва)	0,5 4,0	50 11,5	1,38-2,54	4,12-12,70	5,15	84,5	Не опр. 7,55	2,0 33,6	5,0 28,6	93,5 31,0
Железо (лесная почва)	0,4	1200	0,04	Н.о.	6,86	93,1	1,4	0,1	16,8	81,7
Медь (лесная почва)			Н.о.	Н.о.	5,4	94,6	6,8	5,5	6,8	80,7
Железо (лесная почва)	1,0	500	0,04	0,02	6,86	93,1	3,5	0,1	14,1	82,3
Медь (лесная почва)			Н.о.	Н.о.	5,4	94,6	6,6	3,6	13,8	17,0



Р и с . I. Геоэлектрохимические годографы извлечения металлов

I — железо; 2 — медь; 3 — цинк из черноземной почвы Рудного Алтая: а — район Иртышского месторождения, б — район Камышинского месторождения и лесных почв, в — Кавалеровского и г — Хинганского районов; цифры на кривых — напряженность электрического поля в почве (в В/см)

содержание фульватно-гуматных форм железа. Одновременно уменьшается количество железа в органическом остатке.

Сходные явления в той же черноземной почве установлены и для свинца (см.рис. I, а). В таблице приводятся результаты анализов форм нахождения свинца при низкой напряженности поля 0,5 В/см (время 50 ч) и 4,0 В/см (время 11,5 с). В первом случае в почве после электрического воздействия произошли незначительные изменения: не обнаружена водно-растворимая форма и в несколько раз уменьшилась сорбированная форма. Содержание закрепленных форм оказалось без изменений. Во втором случае в почве резко изменилось содержание форм: в несколько раз увеличилась концентрация водно-растворимых, сорбированных и фульватно-гуматных форм свинца и в 3 раза уменьшилось содержание свинца в остатке — с 93,5 до 31%.

Такие же значительные изменения установлены для лесной почвы в интервале, соответствующем второй ветви. В таблице приводятся результаты анализов по формам нахождения железа и меди, установленным после

электрического воздействия для напряженности поля 0,4 В/см (время 1200 ч) и 1 В/см (время 500 ч) (рис. 1, в). Здесь, так же как и для черноземной почвы, увеличивается содержание водно-растворимых форм, становятся заметными сорбированные формы, увеличивается в несколько раз содержание металлов в фульватно-гуматной форме. Одновременно заметно уменьшается содержание железа и меди в остатке.

Из всех приведенных данных видно, что на начальном интервале извлечение металлов не приводит к заметному изменению в соотношении форм, а количество извлекаемых металлов соответствует примерно их содержанию в водно-растворимых формах. В частности, на интервале, соответствующем начальному участку кривой, количество извлеченного железа по серии экспериментов из черноземной почвы составляет для всех значений напряженностей электрического поля примерно 6-10 мкг/г, а по свинцу - 0,08-0,06 мкг/г, что соответствует 0,05% от валового содержания и близко к концентрации водно-растворимых форм этих металлов в почве.

Такие же соотношения между количеством извлеченных элементов и их содержанием в водно-растворимых формах установлены и по другим почвам на интервалах, соответствующих начальному участку. Извлечение водно-растворимых и слабосорбированных форм на этих интервалах вызывает лишь слабое растворение закрепленных форм. Их переход в подвижное состояние регулируется скоростью восстановления равновесия, а концентрация в почве должна определяться произведением растворимости закрепленных форм. Скорость извлечения может оказаться выше скорости растворения закрепленных форм и тогда концентрация подвижных форм уменьшается. В другом случае эти скорости могут оказаться соизмеримыми, тогда существенных изменений в содержании форм соответствующих элементов не будет заметно, а их содержание в среде должно оставаться на начальном уровне.

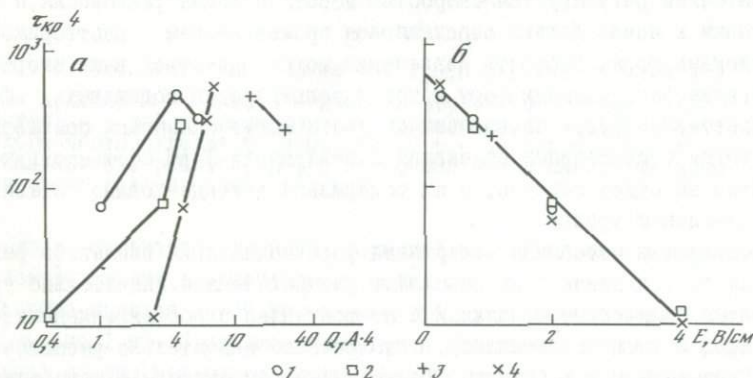
На следующем интервале содержание форм нахождения элементов резко меняется по сравнению с их начальным распределением. Значительно увеличивается количество подвижных и относительно слабозакрепленных форм (фульватов и гуматов металлов). Одновременно значительно уменьшается количество металлов в остатке. Такие изменения связаны с интенсивным растворением закрепленных форм металлов. Извлечение на этой стадии по сравнению с выносом металлов на начальном участке увеличивается на несколько порядков. В частности, количество извлеченного железа из черноземной почвы по серии экспериментов составляет 500-600 мкг/г, а по свинцу - 5-16 мкг/г, что составляет 10% от валового содержания и соответствует концентрации закрепленных форм.

Скорость растворения закрепленных форм оказывается столь значительной, а переход к этой стадии настолько резким, что сам процесс может быть охарактеризован как разрушение. Процесс разрушения закрепленных форм в почве носит сложный характер. Как было показано ранее [2], преобразование форм нахождения металлов протекает так, что од-

новременно разрушаются как гумины и фульвины, так и гуматы и фульваты, но вместе с тем количество гуматов и фульватов пополняется за счет гуминов и фульвинов. Такие изменения свидетельствуют о разрушении закрепленных форм и переходе металлов в подвижное состояние.

Появление в системе подвижных форм нахождения элементов приводит к выносу их из почвы, что отражается на геоэлектрохимических годографах в увеличении угла наклона кривых. Время, соответствующее началу этого процесса, может быть названо критическим.

Для решения практических задач при выборе режимов извлечения важно установить функциональную связь между критическим временем и параметрами, характеризующими интенсивность электрического воздействия. Такими параметрами являются либо сила электрического тока, либо количество прошедшего через почву электричества, либо напряженность электрического поля. На рис. 2, а приведены зависимости критического времени от количества прошедшего через почву электричества для четырех исследованных образцов почв. Приведенные зависимости характеризуются большим разбросом значений. С увеличением количества прошедшего электричества значение критического времени для одних почв уменьшается, для других – возрастает. Приведенные результаты свидетельствуют об отсутствии общей функциональной связи между критическим временем и количеством прошедшего через почву электричества.



Р и с . 2. Зависимость критического времени от количества прошедшего через почву электричества (а) и напряженности электрического поля в почве (б)

1 – для черноземной почвы района Иртышского месторождения (Рудный Алтай); 2 – черноземной почвы района Камышинского месторождения (Рудный Алтай); 3 – лесной почвы Кавалеровского района; 4 – лесной почвы Хинганского района

На рис. 2, б приведены зависимости критического времени от величины напряженности электрического поля в почве. Для всех исследованных образцов почв точки в полулогарифмическом масштабе удовлетворительно ложатся на прямую линию. Уравнение этой прямой может быть представлено в виде

$$\tau_k = \beta \exp(-E),$$

(2)

где  $\tau_k$  — критическое время, ч;

$\beta$  — постоянный коэффициент, равный 700 ч;

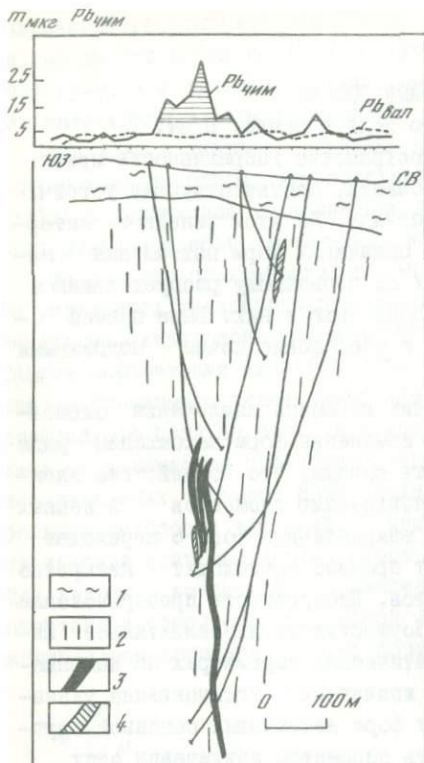
$E$  — напряженность электрического поля в почве, В/см.

Прямая линия рис. 2, Б разделяет пространство напряженность—время на две области. Ниже этой прямой — область, соответствующая устойчивости закрепленных форм нахождения металла. На этом линейном интервале годографа происходит извлечение подвижных форм нахождения металлов в количествах, соответствующих их первичному распределению в почвах и отражающих их начальную концентрацию в них. Выше прямой — область разрушения закрепленных форм и обогащение почвы подвижными формами.

Результаты экспериментов по изучению динамики извлечения элементов из почв и исследование характера изменения форм нахождения ряда элементов во времени позволяют сделать выводы, что воздействие электрического тока на почву приводит к извлечению элементов в ионных формах, преобразованию и растворению закрепленных форм с переходом элементов в подвижное состояние. Этот процесс происходит дискретно для различных форм нахождения элементов. Дискретность преобразования форм нахождения элементов позволяет осуществлять их селективное извлечение из почв при различных энергетических параметрах по напряженности электрического поля и времени извлечения. Установление указанной зависимости для электроподвижных форм нахождения основной группы металлов позволяет регламентировать параметры извлечения этих форм и тем самым исследовать закономерности распределения их в пространстве электрохимическим путем.

В качестве примера выявления глубокозалегающих месторождений по электроподвижным формам в почвах рассмотрим результаты наблюдений методом ЧИМ на территории Рудного Алтая (рис. 3). Здесь в пределах проекции выхода рудных тел на дневную поверхность в почвенном горизонте выявлена аномалия свинца интенсивностью до 35 мкг при фоновом извлечении  $\sim 5$  мкг. Ширина аномалии составляет 100 м. Глубина до кровли рудных тел  $\sim 450$  м, включая 60–80 м — аллохтонные отложения, представленные песчано-глинистыми отложениями. По данным валового анализа, при стандартной методике литохимической съемки [7] повышенных содержаний свинца в почве не установлено.

Многие примеры свидетельствуют о значительной глубинности (сотни метров) выявления рудных объектов различного состава при использовании в качестве информативной — электроподвижных форм нахождения металлов. Использование этих форм, а также вторичных слабозакрепленных форм нахождения элементов [I и др.] для поисков рудных месторождений по эпигенетическим ореолам рассеяния является дальнейшим развитием



Р и с . 3. Результаты наземной литохимической съемки и наблюдений методом ЧИМ на одном из месторождений Рудного Алтая

1 - рыхлые отложения; 2 - вулканогенно-осадочные породы; 3 - полиметаллические руды; 4 - зоны полиметаллической минерализации

поисковой геохимии, основы которой были заложены и развиты трудами Н.И.Сафронова, А.П.Соловова [8], Е.М.Квятковского, В.В.Поликарпочкина и др.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Антропова Л.В. Формы нахождения элементов в ореолах рассеяния рудных месторождений. Л.: Недра, 1975. 144 с.
2. Гольдберг И.С. Электрохимическое извлечение элементов из горных пород. //Методика и техника разведки. Л.: ОНТИ ВИТР, 1975. С. 59-65.
3. Гольдберг И.С. Электрохимическое извлечение элементов из горных пород: сообщ.3. //Там же. 1979. № 127. С. 59-66.
4. Поиски и разведка рудных месторождений методом ЧИМ: XX Метод. рекомендации /И.С.Гольдберг, А.В.Иванова, С.Г.Алексеев и др.Л.:ОНТИ ВИТР, 1976. 75 с.
5. Сафронов Н.И. А.с. № 46005 (СССР). Способ электрохимического отбора проб: Оpubл. в Б.И., 1935.
6. Сафронов Н.И. Основы геохимических методов поисков рудных месторождений. Л.: Недра, 1971. 215 с.
7. Соколова А.И. Электрохимический метод поисков колчеданных месторождений. //Изв.вузов. Геология и разведка. 1967. № 3.С.107-118.
8. Соловов А.П. Геохимические методы поисков месторождений полезных ископаемых: Учебн.для вузов. М.:Недра,1985. 294 с.

## К ВОПРОСУ О НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОМ ПРОГРЕССЕ В ПРИМЕНЕНИИ ЛИТОХИМИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ПРИ ПРОГНОЗИРОВАНИИ И ПОИСКАХ СЛАБОПРОЯВЛЕННЫХ ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Необходимость выявления слабопроявленных рудных месторождений возникает в определившихся рудных узлах в радиусе действия горнорудных предприятий.

Возможны два пути решения этой проблемы: непосредственное достоверное опойсывание исходной площади и выделение локальных перспективных участков с их последующей детализацией. Первый путь очень дорог. Второй путь представляется оптимальным. В связи с большими объемами предшествующих геохимических исследований в определившихся рудных узлах возникает также задача опережающего определения достоверности выявления рудных полей, месторождений и рудных залежей.

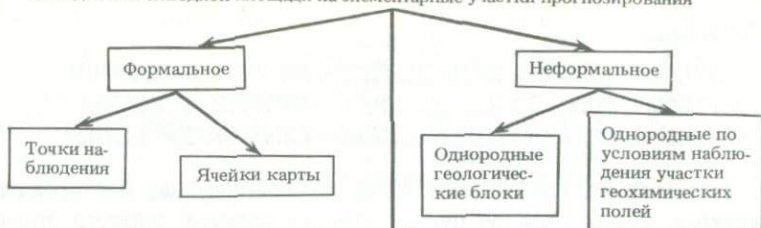
Ниже рассмотрим основные трудности, с преодолением которых и связано в основном повышение эффективности литохимических методов при прогнозно-поисковых работах.

Локальное прогнозирование. При локальном прогнозировании с использованием литохимической информации выполняется ряд сложных взаимосвязанных операций: разбиение исходной площади на элементарные участки прогнозирования, соизмеримые с размерами объектов прогнозируемого ранга; решение прямой задачи, заключающейся в выявлении признакового пространства и составлении решающих правил, которые должны лежать в основе прогнозирования; решение обратной задачи, заключающейся в прослеживании признаков в каждом элементарном участке прогнозирования и выделении на основе решающих правил потенциально рудных объектов; ранжирование потенциально рудных объектов по перспективности (рис.1).

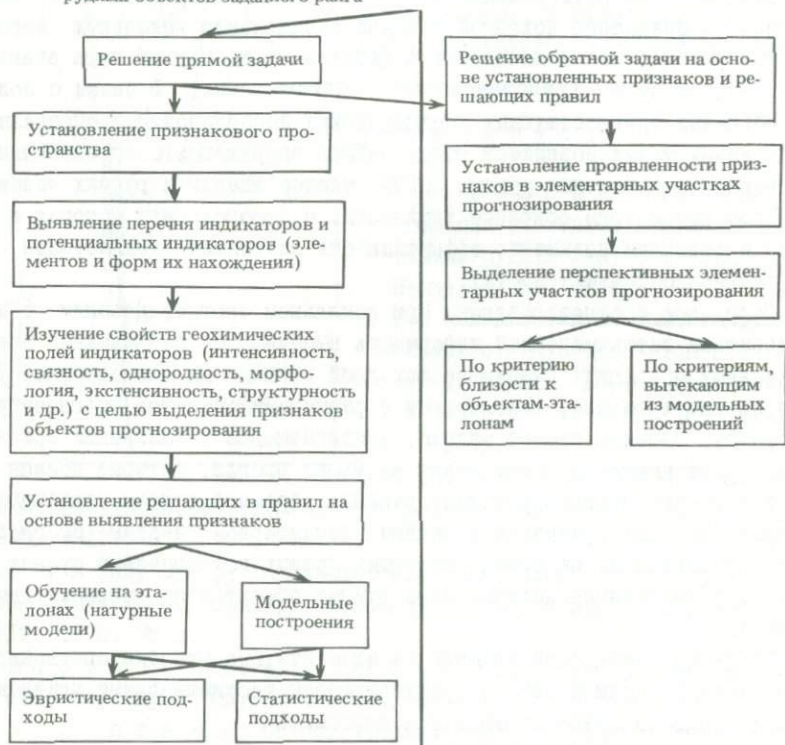
Разделение исходной площади на элементарные участки прогнозирования, которые должны быть охарактеризованы геохимическими признаками, может осуществляться формально и неформально.

Среди формальных способов в явном или неявном виде выделяются два: участок, опирающийся на одну точку, которой мысленно приписывается некоторая область влияния [2-5, II, I2, I4], и ячейка, включающая группу таких точек; по характеристикам этой группы точек судят об особенностях геологического (геохимического) пространства, заключенного в ячейке [6,7]. В последнем случае вся исходная площадь разбивается на ячейки одного размера обычно квадратной формы. Часто используются скользящие окна с некоторым шагом. Применяемые системы характеризуются одинарным или двойным скользящими окнами [4,6]. В последнем случае большее окно соответствует объекту предыдущего иерархического ранга, а меньшее, вписанное в него, - объекту прогнозируемого ранга.

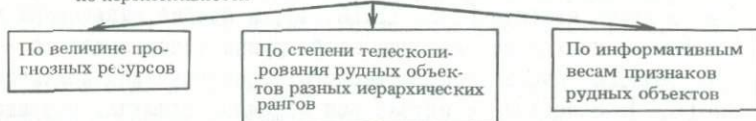
I. Разделение исходной площади на элементарные участки прогнозирования



II. Выделение среди элементарных участков прогнозирования потенциально рудных объектов заданного ранга



III. Ранжирование выделенных участков потенциально рудных объектов по перспективности



Литохимические методы при крупномасштабном прогнозировании рудных объектов

Двойные окна позволяют дать аномальный эффект относительно тренда фоновых содержаний индикаторов.

При неформальном подходе исходная площадь разделяется либо на блоки (элементарные участки), однородные по геологическому строению или истории геологического развития, либо на участки, однородные по условиям наблюдения геохимического поля. При этом элементарные участки прогнозирования характеризуются разной формой и имеют неодинаковые размеры.

Вид деления исходной площади накладывает ограничения на свойства используемых при прогнозировании геохимических признаков. Так, например, отдельные точки наблюдений не могут характеризоваться свойствами неоднородности, сплошности и т.п. В этом случае при прогнозировании используется главным образом свойство интенсивности (содержания индикаторов или их превышения над фоном, мультипликативные коэффициенты и т.п.).

При применении скользящих окон могут также использоваться характеристики, учитывающие экстенсивный фактор (свойства связанности, однородности, морфологии и т.п.). Вместе с тем возникают сложности с обоснованием размера скользящего окна, шага смещения по профилю и минимального числа точек наблюдения в окне, достаточного для выделения эффекта.

Отсутствие общепринятых принципов выбора способов деления исходной площади на элементарные участки прогнозирования и ограничений для применения каждого из них не может не сказаться на эффективности использования литохимических данных для локального прогнозирования.

Выделение среди элементарных участков прогнозирования потенциально рудных объектов заданного ранга является основным содержанием локального прогноза. Это выделение связано с решением прямой и обратной задач (см. рис. I). Цель решения прямой задачи — выявление признаков и установление решающих правил; цель решения обратной задачи — выделение на исходной для прогноза площади потенциально рудных объектов на основе прослеживания признаков и применения решающих правил.

Решение прямой задачи для выявления признаков прогнозируемых рудных объектов необходимо составить и проанализировать признаковое пространство. Признаковое пространство оформляется в виде схемы с двумя входами, один из которых представляет перечень индикаторов, другой — свойства геохимических полей индикаторов и примененные для характеристики этих свойств показатели. В клетках такой схемы расположены признаки, которые представляют интервалы значений показателя.

Такая схема является продуктом серьезных исследований. Ее создание нередко сопряжено с большими сложностями. В частности, эти сложности связаны с отсутствием эталонных объектов, недостаточными порогами определения элементов-индикаторов, отсутствием сводок по геохимическим признакам месторождений различных типов, недостаточной изученностью свойств геохимических полей и их показателей; например, "отрицатель-

ные" ореолы как прогностный признак начали применять лишь в самое последнее время [2,5,13].

Сложность построения схемы заключается также и в том, что одно свойство может характеризоваться разными показателями. Так, характер связи между содержаниями элементов-индикаторов определяют разные показатели; коэффициенты корреляции (параметрические и ранговые, парные и множественные), коэффициенты сопряженности, главные компоненты и факторные нагрузки.

Особую сложность представляют выделение информативных интервалов и установление признаков. Эти работы связаны с формированием критериев оптимальности. В качестве последних при наличии эталонных объектов целесообразно использовать величину ошибок I рода (пропуск объекта) и II рода (ложная тревога).

Возникают и сложности выбора решающих правил, основанных на эвристических или статистических подходах, что определяется разнообразием условий работ (наличие или отсутствие объектов-эталонов), обоснованностью моделей, следующих из априорных представлений, и отсутствием граничных условий применения решающих правил для данных условий.

Решение обратной задачи сопряжено с прослеживанием геохимических признаков и применением решающих правил. Для прослеживания признаков необходимо провести геохимическую съемку, обеспеченную определением комплекса элементов-индикаторов. При этом возникают сложности, связанные с масштабом работ, порогами определения (чувствительности) важных элементов-индикаторов As, Sb, Bi и некоторых других элементов), определением наиболее разряженной сети наблюдений при минимальной ошибке I рода. Кроме того, при отсутствии на исходной площадке эталонных объектов возникает проблема оценки результата прогнозирования. В этом случае исходят из того, что чем выше частота одноименных оценок элементарных участков по решающим правилам, основанным на разных обоснованных модельных представлениях о рудных объектах, (или частота одноименных экспертных оценок), тем выше надежность их выделения как потенциально рудных объектов.

Для решения обратных задач с применением ЭВМ целесообразно составлять таблицы объект-свойства (ТОСы) имеющие два входа. По одному входу располагают элементарные участки прогнозирования, по другому - либо прогнозные признаки, либо показатели свойств (если необходимо получать промежуточные решения). В клетках схемы показывают проявленность признаков (либо значения показателей). Составление подобных ТОСов позволяет применить для решения геологопрогностных задач с использованием литохимической информации разработанную в ИИМСе автоматизированную систему "Алиса".

Следовательно, применение литохимической информации для выделения среди элементарных участков прогнозирования потенциально рудных объ-

ектов сдерживается недостаточной разработанностью методологии решения прямой и обратной задач.

Ранжирование потенциально рудных объектов по перспективности осуществляется главным образом на основе использования геохимической информации разными путями, причем каждый путь может быть реализован не одним способом.

Так, например, подсчет прогнозных ресурсов объектов ранга месторождений, помимо способа, предложенного А.П.Солововым [14,15], который предусматривает оценку площадной продуктивности первичных или остаточных ореолов рудообразующего элемента-индикатора и глубины эрозийного вскрытия оцениваемого объекта в метрике эталона; имеется еще ряд путей оценки прогнозных ресурсов геохимическими методами [9]. Исходные величины для оценки прогнозных ресурсов геохимическими методами могут быть определены на основе проведения литохимических съемок коренных пород или кор выветривания и оригинальных методов интерпретации.

Вместе с тем граничные условия применения разных способов для ранжирования объектов одного ранга не определены, опыт применения различных способов незначителен, и поэтому статистика ошибок ранжирования неизвестна. Все это затрудняет проведение эффективного ранжирования потенциально рудных объектов по перспективности. По-видимому, к более перспективным следует относить те объекты, которые перспективны по сумме разных способов и путей ранжирования.

Проектирование поисков для выявления слабопроявленных месторождений. Как правило, в радиусе действий горнорудных предприятий - на площадях рудных узлов и полей - за многие годы работ накапливается большое количество литохимической информации, в частности литохимических съемок разных лет, которые проводились с применением разных технических средств, разными методами, в разных масштабах, возможно, с определением неодинаковых комплексов элементов с разными пороговыми чувствительностями и погрешностями.

Все это определяет крайне неравномерное распределение точек наблюдения на исходной площади и их неодинаковую цену в смысле достижения представительного горизонта поисков и определения хотя бы нижнеаномальных содержаний элементов-индикаторов. Приведение этой информации к приемлемо однородному виду по достоверности наблюдений представляет известные сложности. Они преодолеваются с малыми потерями, если для площадей построены в соответствующем масштабе карты мощностей и фаций рыхлых отложений и известны глубины и технические средства взятия проб для каждого способа. В противном случае берется лишь информация по наиболее достоверному методу, а результаты остальных методов отбрасываются, хотя при этом и теряется значительная информация<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>Для решения указанных задач целесообразно составление банка геохимические данные.

Если при учете точек, вскрывших представительный горизонт (точек достоверных наблюдений), последние окажутся размещенными по более или менее правильной прямоугольной сети и если ореолы искомого объекта можно аппроксимировать эллиптической формой, то вероятности их обнаружения заданным числом точек наблюдения можно оценить в первом приближении на основе таблиц И.Д.Савинского или номограмм Г.С.Вахромеева [1,10].

Если же точки достоверных наблюдений размещены на исходной площади неравномерно, а объекты поисков при этом характеризуются неправильной формой, но площадь их известна, то вероятность обнаружения этих объектов заданным числом точек можно оценить приближенно по уравнению А.М.Шурыгина [16] с дополнениями<sup>1</sup>:

$$P_{ij}^{>k} = 1 - (e^{-S_{ij}/F_i}) \{ 1 + S_{ij}/F_i + 0,5S_{ij}^2/F_i + [1/(k-1)](S_{ij}/F_i)^{k-1} \},$$

где  $P_{ij}^{>k}$  - вероятность пересечения геохимического ореола в ячейках квадратной формы площадью  $F$  числом точек  $\geq k$ ;  $n_{ij}$  - число точек достоверных наблюдений в ячейках с номером  $i$  методом  $j$ . При этом  $n_{ij} = N_{ij} a_{ij}$ , где  $a_{ij}$  - доля площади в ячейке  $i$ , доступная для наблюдения методом  $j$ ;  $N_{ij}$  - общее число точек наблюдения.

При таком подходе мы можем столкнуться с некоторым несоответствием модельных ограничений с практикой расчета. Однако величина погрешностей расчета из-за нарушения модельных ограничений соизмерима с величиной погрешностей приведения объектов неправильной формы к эллиптическому виду [1,8,10].

Некоторые трудности возникают также при определении размеров ячейки  $F$ , которая влияет на величину  $n_{ij}$ . В первом приближении можно принять, что величина  $F$  должна быть по размеру больше размеров искомого объекта и соответствовать масштабу проектируемых прогнозно-поисковых работ. Так, для работ масштаба 1:50 000-1:25 000 размер  $F$ , по-видимому, должен быть около 0,5 км<sup>2</sup>.

Составление карт достоверности опоскования позволяет выделить участки, опоскованные с разной достоверностью, и в соответствии с этим запроектировать размещение точек наблюдения поисковой сети.

Действительно, определение числа точек сети  $n_{ij}$ , обеспечивающих при доопосковании ячеек  $F_i$  методом  $j$  число достоверных наблюдений  $n_{ij}$  и подсечение искомого объектов числом точек  $k$  с заданной вероятностью  $P_{ij}^{>k}$ , производим через обратную вероятность:

$$P_{ij}^{>k} = 1 - (1 - P_{1iz})(1 - P_{2iz}),$$

где  $P_{1iz}$  - вероятность обнаружения геохимического ореола объекта в ячейке  $i$  суммой методов  $j$  числом точек не менее  $k_{ij}$  по данным предшествующих работ;  $P_{2iz}$  - искомая вероятность подсечения объекта в ячейке  $i$ , дополняющая вероятность  $P_{1iz}$  до заданной.

<sup>1</sup> Дополнения к формуле предложены Д.И.Першиным.

Принимая  $P^{(2)} = 0,8$ , определяем  $P_{21}^{(2)}$  и дополнительное число точек достоверных наблюдений  $n_{1j}$  по таблицам, номограммам или формулам [I, IO, I6]. Тогда общее число точек наблюдения, обеспечивающих данную вероятность обнаружения, должно быть:

$$N = \sum_{1j} \frac{n_{1j}}{a_{1j}} = \sum_{1j} N_{1j} .$$

Следовательно, предлагаемый подход позволяет в первом приближении определить минимальное число точек наблюдения для доопределения исходной площади с вероятностью обнаружения не менее заданной. Другие аспекты повышения эффективности литохимических поисков слабопроявленных месторождений, связанных с определением комплекса элементов-индикаторов, формулированием рациональных требований к аналитическим методам (комплексность, оперативность, правильность, воспроизводимость, пороги чувствительности и определения), методами построения геохимических карт и т.д. здесь не рассматриваются. Отметим только, что отсутствие сводок и справочников по соответствующим упомянутым выше вопросам существенно препятствуют оптимальному проектированию поисковых работ на слабопроявленные месторождения.

Таким образом, дальнейший прогресс в применении литохимических методов для решения прогнозно-поисковых задач, у истоков которого стояли Н.И.Сафронов и А.П.Соловов, тормозится слабой разработанностью прогнозных и поисковых моделей рудных полей и месторождений, отсутствием методики выбора оптимальных решений по обработке геохимической информации для прогнозных и поисковых целей, недостаточностью имеющихся сводок и обобщений по геохимическим предпосылкам и признакам разнотипных месторождений и рудных полей.

Преодоление возникших трудностей связано с усовершенствованием теории формирования первичных геологических полей и их трансформаций под влиянием разного рода эпигенетических процессов, усовершенствованием теории выбора оптимальных решений в свете системного подхода, автоматизацией аналитических работ с применением ЭВМ, созданием банков геохимической информации, разработкой аналитических методов, обеспечивающих выявление комплекса индикаторов с доктларковыми чувствительностями определения при приемлемых погрешностях, разработкой признаков пространств и решающих правил и т.п.

Надежное решение прогнозно-поисковых задач требует охвата месторождений разного состава, совместных усилий специалистов разных направлений. Вот почему для дальнейшего научно-технического прогресса в использовании геохимических методов для прогнозно-поисковых работ необходима постановка проблемных фундаментальных исследований.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Вахромеев Г.С. Основы методологии комплексирования геофизических исследований при поисках рудных месторождений. М.: Недра, 1978. 52 с.
2. Гинзбург И.И., Россман Г.И., Муканов К.М. и др. Применение геохимических методов при металлометрических исследованиях рудных районов. М.: Недра, 1966. 295 с.
3. Григорян С.В. Первичные геохимические ореолы при поисках и разведке рудных месторождений. М.: Недра, 1987. 408 с.
4. Дубов Р.И. Количественные исследования геохимических полей для поисков рудных месторождений. Новосибирск: Наука, 1974. 279 с.
5. Инструкция по геохимическим методам поисков рудных месторождений. М.: Недра, 1983. 191 с.
6. Каждан А.Б., Пахомов В.И. Обработка исходных эмпирических данных с позиций системного подхода к изучению недр. // Сов. геология, 1986. № II. С.3-11.
7. Островский Э.Я. Аэрогеофизические исследования и целевой прогноз. // Изв. вузов. Геология и разведка. 1984. № II. С.69-77.
8. Россман Г.И. Выбор размеров поисковой сети при геохимических поисках и оценка оподожованности территории. // Минеральное сырье. М.: Недра, 1967. № I7. С. 148-156.
9. Рундквист Д.В., Нежинский И.А. Количественное прогнозирование и некоторые вопросы теории металлогении. // Разведка и охрана недр. 1984. № 7. С.18-29.
10. Савинский И.Д. Таблицы вероятностей подсечения эллиптических объектов прямоугольной сетью наблюдений. М.: Недра, 1964. 110 с.
11. Сафронов Н.И. Основы геохимических методов поисков рудных месторождений. Л.: Недра, 1971. 215 с.
12. Смыслов А.А. Уран и торий в земной коре. Л.: Недра, 1974. 231 с.
13. Смыслов А.А. Принципы и методика геохимических исследований при прогнозировании и поисках рудных месторождений. М.: Недра, 1979. 247 с.
14. Соловов А.П. Геохимические методы поисков месторождений полезных ископаемых. Учебн. для вузов. М.: Недра, 1985. 294 с.
15. Соловов А.П., Матвеев А.А. Геохимические методы поисков рудных месторождений: Учеб. пособие. М.: Изд-во МГУ, 1985. 232 с.
16. Шурьгин А.М. Расчет оптимальных сетей для поисков эллиптических залежей. М.: Недра, 1972. 93 с.

## МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ СОВРЕМЕННОЙ ПОИСКОВОЙ ГЕОХИМИИ

Характерной чертой современной поисковой геохимии является акцент на углубленное изучение тонких особенностей геохимического поля. Большой вклад в это направление внесен одним из основателей поисковой геохимии А.П.Солововым.

Два аспекта проблемы поисковой геохимии определяют ее эффективность: качество исходной геохимической информации (ИГИ) и корректность первичной обработки данных.

Основой поисковой геохимии являются данные о содержаниях химических элементов в исследуемых горных породах и других природных образованиях. Шуточное замечание Д.М.Шоу [14, с.73]: "Геохимия — это компиляция анализов, неточных, невозпроизводимых и несогласующихся" подтверждает, с одной стороны, тезис о том, что основой ИГИ являются результаты анализов и, с другой — неудовлетворительное метрологическое обеспечение этих результатов. Такое положение с качеством анализов на ранних этапах становления поисковой геохимии (1930–1950 гг.), когда главной ее задачей считалось выявление аномалий геохимического поля, было терпимым. В свете современных задач поисковой геохимии требования к качеству ИГИ должны существенно ужесточаться.

Из ряда метрологических параметров, характеризующих данный аналитический метод, для поисковой геохимии наиболее важным является предел обнаружения (ПО) определяемого этим методом химического элемента. Особое значение ПО обусловлено тем, что геохимические поиски обычно проводятся в области геохимических полей, соизмеримых с ПО. Нельзя не отдать должного авторам действующей инструкции по геохимическим методам [4], которые это обстоятельство учли рядом достаточно жестких требований к ПО.

Нами в ряде работ [15, 17, 18 и др.] показано, что результат анализа (измерений), меньший удвоенного ПО, в среднем завышен (так называемое метрологическое завышение), в связи с чем такие результаты не могут быть использованы для каких-либо количественных расчетов. Практических доказательств наличия эффекта метрологического завышения немало, например снижение со временем кларков химических элементов при их содержаниях более  $10^{-4}$  мас.%, "селеновый бум" [5], динамика результатов аттестации государственных стандартных образцов (ГСО) и т.д. Включение в обработку результатов анализов, близких к ПО, внесет искажения не только в оценку средних содержаний исследуемых химических элементов, но и в оценку второго важнейшего показателя — геохимической дисперсии.

Для характеристики точности результатов анализов рассматривают два вида погрешностей: сходимости и воспроизводимости, первые — по

результатам анализов, выполненных в одинаковых условиях<sup>1</sup>, вторые – по результатам анализов, выполненных в различных условиях (в разное время, в различных лабораториях, различными методами и т.д.).

В поисковой геохимии обычно все пробы, даже отобранные на одном участке, редко анализируются в одно и то же время, поэтому погрешность воспроизводимости является более важной характеристикой, чем погрешность сходимости. Воспроизводимость приобретает особое значение, когда сопоставляются результаты геохимических исследований, выполненных в различное время, разными исследователями и различными аналитическими методами.

Как известно, при оценке природной геохимической дисперсии необходимо из величины общей дисперсии исключить технические погрешности, обусловленные погрешностями пробоотбора, пробоподготовки и анализа, т.е. должны учитываться погрешности воспроизводимости результатов геохимической съемки.

Геохимическая дисперсия может быть надежно определена, если ее возможно статистически значимо отделить от технической дисперсии. Отсюда следует, что для оценки геохимической дисперсии очень важно использовать аналитические методы с минимальной погрешностью воспроизводимости.

До последнего времени считалось, что правильность результатов анализов (отсутствие систематических погрешностей) в поисковой геохимии не имеет существенного значения, так как выводы о результатах геохимических исследований обычно делаются на основе относительных сопоставлений. Такой подход к правильности результатов анализа при современных задачах геохимии является ошибочным. Необходимо учитывать, что ИГИ используется для построения региональных геохимических карт, и в тонких методах обработки ИГИ приобретают абсолютные значения геохимических показателей. Как показано нами [16], мультипликативно систематические погрешности оказывают влияние на значения очень важного геохимического параметра – геохимического коэффициента корреляции – и снижают эффективность геохимических поисков в закрытых районах.

Для получения объективных данных о качестве аналитических работ геохимик должен направлять одновременно с партией проб на анализ стандартные образцы (СО) и зашифрованные дубликаты рядовых проб. Оптимальным является случай, когда эти СО по вещественному составу соответствуют анализируемым пробам. В настоящее время во многих регионах СССР (Украина, Прибалтика, Белоруссия и т.д.) создаются региональные геохимические СО. Наличие таких СО даст возможность существенно улучшить метрологическое обеспечение геохимических исследований. На современном этапе к решению задач поисковой геохимии необходимо

<sup>1</sup> В Международном словаре по метрологии термины "повторяемость" и "сходимость" имеют одинаковый смысл.

по возможности привлекать аналитические методы, обладающие ПО существенно ниже уровня геохимического фона с достаточными по отношению к дисперсии геохимического фона воспроизводимостью и правильностью.

Результаты полуколичественного анализа могут и должны оставаться для обзорной оценки исследуемого района, однако основу ИГИ необходимо постепенно переводить на количественные аналитические методы<sup>1</sup>. При таком переходе необходимо учитывать и экономическую сторону вопроса. Если, например, использовать многоканальные рентгеновские анализаторы, которые могут одновременно анализировать несколько десятков химических элементов, то стоимость одного элементопределения может быть приближена к стоимости полуколичественного атомно-эмиссионного спектрального анализа при несравненно лучшей воспроизводимости и правильности. Технические возможности для этого весьма реальны.

Фирма "Филипс" разработала рентгено-флуоресцентный спектрометр Рw-1606, имеющий 28 фиксированных каналов. Спектрометр снабжен микропроцессорной системой управления анализом и обработки данных. На приборе выполняется анализ порошковых и жидких проб с ПО порядка  $10^{-4}$  мас. %.

Геохимики хорошо знают преимущество точных результатов анализов по сравнению с данными полуколичественного анализа, и если они будут настойчивы в своих требованиях, аппаратуристы сумеют в короткие сроки оснастить аналитические лаборатории многоканальными анализаторами. Тем самым будет обеспечена более высокая эффективность геохимических исследований.

Корректность первичной математической обработки ИГИ имеет исключительно важное значение.

В геохимии, как и во многих других прикладных науках, широко используются методы математической статистики, часто без учета условий их применения. При неправильной обработке ИГИ даже по прецизионным аналитическим данным могут быть получены ошибочные выводы. Некоторые математические приемы обеспечивают возможность получения правильных выводов даже при недостаточно точных или численно неопределенных аналитических данных. Так, например, применение медианы позволяет правильно оценить геохимический фон, если число наблюдений, меньших ПО (лучше меньших двух ПО), или аномальных данных будет меньше 50%. Среднее арифметическое в этом случае принципиально не применимо.

Как известно, в теории вероятностей на основе априорно заданных моделей устанавливаются законы распределения (ЗР) случайных величин (СВ), характеризующих эти модели. В математической статистике решаются обратные задачи — установление по экспериментальным данным ЗР СВ и их параметров. Если прямая задача имеет одно единственное реше-

<sup>1</sup> Выражение "количественный аналитический метод" не совсем точное, так как результаты анализов даже прецизионного метода в области ПО могут быть полуколичественными, поэтому более правильно делить на "количественные" и "полуколичественные" результаты анализов, а не методы.

ние, то обратная задача отличается множеством эквивалентных решений. Можно привести из литературы немало примеров, где одни и те же экспериментальные данные одинаково хорошо аппроксимированы различными ЗР и соответственно существенно различными параметрами. В условиях отсутствия априорного значения ЗР (по геологическим объектам практически во всех случаях) неотрицательный результат проверки согласия эмпирических данных какому-нибудь выбранному ЗР не является основанием для принятия проверяемой гипотезы.

Все статистические критерии проверки гипотез могут лишь опровергать, но не подтверждать проверяемые гипотезы. Во многих случаях, в том числе и по геологическим объектам, оказываются сомнительными вероятностно-статистическая природа исследуемых СВ, а следовательно, и применимость статистических методов обработки экспериментальных данных. В последнее десятилетие применимость статистических методов обработки экспериментальных данных вызывает резкую критику со стороны многих видных статистиков как в СССР (И.С.Грекова, Ю.И.Алимов, В.Н.Тутубалин и др.), так и за рубежом (Тьжи Дж., Мостеллер Ф. и др.) И.С.Грекова в 1976 г. [3] писала, например, по поводу доверительных интервалов: «Для этого разработан довольно тонкий аппарат, основанный на допущении, что нам известен закон распределения случайной величины (нормальный), и опять возникает вопрос: а откуда собственно это известно? И с какой точностью? И какова, наконец, практическая ценность самого "продукта - доверительного интервала"?». Еще более резкие возражения против применения математической статистики высказал Ю.И.Алимов в работе [2].

В монографии А.П.Соловова [9] указано, что принимаемое за основу нормальное распределение содержаний элементов или их логарифмов - не более чем удобная аппроксимация. Следовало бы лишь добавить, что подобная аппроксимация не должна использоваться для генетических выводов. Ее удобство состоит в возможности свертывания информации, но без экстраполяции за исследованные интервалы при ее разворачивании.

С.А.Айвазян и др. [1] признают, что предостережения некоторых авторов (Ю.И.Алимова и др.) по поводу вреда от чрезмерного (а порой бездумного) использования вероятностно-статистических методов в качестве главного инструмента обработки исходных данных являются уместными и полезными, но считают, что нельзя отбивать всякую охоту пользоваться этими методами. По нашему мнению, обязательно надо "отбивать охоту" пользоваться некорректными методами обработки экспериментальных данных. В последние годы в основном благодаря исследованиям выдающегося американского статистика Дж.Тьжи предложена альтернатива математической статистике - "анализ данных". В этом методе используются заранее заданные критерии - функционалы качества метода, основанные на эвристических соображениях содержательного (профессионального) плана. Метод анализа данных в настоящее время широко используется за рубежом, в особенности при принятии ответственных решений

(в космонавтике, в военном деле и т.д.) и в СССР. Газета "Московские новости" от 14 июня 1987 г., рассказывая об исключительно успешном опыте применения метода анализа данных в экономике, называет его "методом века".

С.А. Айвазян и В.М. Бухштабер [1] считают, что в перспективе "целесообразно разработать единую методологию построения статистических правил, объединяющую в себе оба упомянутых выше направления" и предлагают, следуя Бензекри, соответствующую этому направлению научную дисциплину назвать "прикладной статистикой".

Из приведенного краткого обзора состояния вопроса обработки экспериментальных данных, отражающего передний край этой проблемы, очевидно, насколько далеко от этого края находится методика обработки экспериментальных данных в отрасли геологии вообще и в геохимии в частности.

Мы не считаем практически возможным и необходимым сразу переориентировать обработку результатов геохимических исследований на метод анализа данных. Есть, однако, подходы, которые даже в пределах методов математической статистики могут обеспечить более корректные решения. Речь идет о непараметрических и робастных методах обработки экспериментальных данных. Применяя непараметрические методы, исследователь сразу исключает требование априорного знания истинного ЗР, а в некоторых случаях (при оценках медианы и математического ожидания, MAO) и требование симметричности распределения. Эти методы крайне просты в применении, в большинстве этих методов не требуется для расчетов микрокалькуляторов или ЭВМ, что очень важно для геохимика-полевика [13]. Используя при обработке данных непараметрическими методами еще интуицию и опыт геохимика, можно компенсировать недостатки, связанные со статистическими подходами.

В настоящее время обработка экспериментальных данных в отрасли геологии ведется, как правило, методами параметрической статистики, т.е. методами, основанными на априорном знании ЗР исследуемых компонент в геологических объектах, что принципиально ошибочно, поскольку истинный ЗР не может быть установлен вследствие сложности учета факторов, влиявших на механизм образования этих объектов. Возможность установления истинного ЗР путем аппроксимация эмпирических данных каким-либо теоретическим ЗР принципиально исключена. Часто встречающееся в литературе обращение к центральной предельной теореме (ЦПТ) для доказательства возможности применения нормального закона несостоятельно, так как, во-первых, стремление к этому ЗР суммированием СВ, согласно формулировке Линдберга и Леви, имеет место при условии, что все эти СВ имеют один и тот же закон распределения, что не всегда реализуется и, во-вторых, ЦПТ не работает на "тяжелых хвостах" распределений, обычно характерных для ИГИ. Не случайно авторы работы [1] рекомендуют пользоваться ЦПТ с осторожностью.

Для класса задач, решаемых непараметрическими методами, целесообразно использовать так называемые "робастные" методы, в которых наличие некоторой доли аномальных вариантов<sup>1</sup> не скажется на правильности оцениваемых параметров. Не всякая непараметрическая оценка является робастной. Среднее арифметическое и среднее квадратическое (СКО) отклонения, например, являются непараметрическими, но и не робастными оценками положения и рассеяния соответственно. Медиана, среднее арифметическое отклонение (САО) и медиана абсолютных отклонений от медианы (МАО) являются и непараметрическими и робастными оценками<sup>2</sup>.

Необходимость в использовании робастных методов оценивания обусловлено тем, что все известные методы установления аномальных данных пригодны лишь для аномальных (т.е. распределенных по нормальному закону) вариант. Корректное исключение аномальных данных возможно лишь по профессиональным соображениям, устранение влияния этих данных без их исключения возможно методами робастного оценивания.

Применяя непараметрическую статистику, следует помнить, что и она не свободна от некоторых недостатков, свойственных математической статистике вообще. Речь идет, в частности, об уровне значимости и соответственно о доверительных интервалах.

Выбор уровня значимости для принятия решений весьма условен. Лишено здравого смысла принятие различных решений в зависимости, например, от фактических уровней значимости 4 и 6% при принятом критическом 5%. А ведь такие рекомендации имеются во многих руководствах и научных статьях. Один выдающийся статистик заметил: "...чтобы получить значимый результат для любых данных, нужно дать их проанализировать нескольким статистикам, и уж хотя бы один из них обязательно найдет что-нибудь значимое".

При проверке статистических гипотез следует иметь в виду эффекты слишком малых и больших выборок. При малых выборках вывод оказывается статистически ненадежен (малая мощность критерия), при больших выборках вывод однозначно предоставлен (большая выборка почти наверняка отвергает проверяемую гипотезу при любом уровне значимости). Выход здесь один: при принятии решения широко использовать профессиональную (т.е. внестатистическую) информацию.

Непараметрическая статистика в геохимии не использовалась, так как,

---

<sup>1</sup> По исследованиям последних лет наличие аномальных, или "сорных", вариант (т.е. не принадлежащих исследуемой генеральной совокупности) имеет место практически всегда. В геохимии такая ситуация может быть связана, например, с трудностями разделения по профессиональным признакам данных, принадлежащих различным геологическим объектам. Методами параметрической статистики корректное выделение аномальных вариант невозможно, так как для этого необходимо знать величину геохимического фона, который, в свою очередь, должен рассчитываться без аномальных вариант.

<sup>2</sup> Для возможности сопоставления МАО со СКО в случае нормального распределения необходимо учесть, что МАО в 1,5 раза меньше СКО, а САО в 1,25 раз меньше.

во-первых, считалось, что не все задачи геохимии могут быть решены этим методом и, во-вторых, что методы непараметрической статистики имеют по сравнению с параметрическим методом худшие эффективность и доверительный интервал. Первая причина уже устранена, так как за последние годы непараметрические методы разработаны практически для всех задач, решаемых параметрическими методами. Второе утверждение, будучи верным для идеальных условий (отсутствие засорения в выборке) оказывается ошибочным для практических условий. Достаточно, например, более двух сорных наблюдений на выборку объемом тысяча, чтобы эффективность оценки рассеяния по САО оказалась выше, чем по СКЮ. При засорении нормально распределенной выборки с 10% наблюдений, имеющих дисперсию, в 100 раз большую, чем у незасоренной, медиана оказывается в 6 раз эффективнее среднего арифметического.

Методы непараметрической статистики разработаны для оценки параметров положения (медиана и др.) и рассеяния (САО, МАО и др.), коэффициентов корреляции (по Спирмену), коэффициентов регрессии (по статистике Тейла). Этими методами возможна непараметрическая замена критерия Стьюдента (критерий Манна-Уитни), выполнение однофакторного (по Красклу-Уоллису) или двухфакторного (по Фридману) дисперсионного анализа и т.д. Методы решения этих задач изложены в работах [6-8, II-13] и др.

В заключение следует упомянуть новый метод обработки экспериментальных данных - "бутстреп", предложенный в 1977 г. американским математиком Б.Эфроном. Метод может быть использован в параметрическом и непараметрическом вариантах. Суть метода заключается в том, что по выборке объемом  $n$  каждое ее значение "тиражируется" в большем числе экземпляров ( $> 100$ ), затем после рандомизации полученного массива данных отбирается много выборок, каждая объемом  $n$ . По каждой выборке рассчитываются искомые статистики. Метод может использоваться только при наличии ЭВМ. Методу "бутстреп", в том числе и применению его в геологической области посвящена подборка из шести статей в журнале "Заводская лаборатория" за 1987 г., № 10.

Приведем пример, иллюстрирующий корректность и простоту расчетов при непараметрической оценке основных геохимических параметров - геохимического фона и стандарта. В работе [10] приведены результаты поисковой литохимической съемки по свинцу масштаба 1:50 000. На поисковой площадке имеется довольно обширная зона аномальных содержаний свинца. При оценке геохимического фона и стандарта авторами из расчетов были исключены не только аномальные данные, но и часть нормальных значений, примыкающих к аномальной зоне. Расчеты параметров геохимического фона ими велись в предположении логнормального распределения свинца на поисковой площадке. После сложных расчетов была получена величина геохимического фона, равная  $8,9 \cdot 10^{-4}\%$  свинца, а нижнее аномальное значение его  $25 \cdot 10^{-4}\%$  свинца.

Для иллюстрации простоты и эффективности рекомендуемого нами метода отобран один самый короткий профиль (XXIII), т.е. самый невыгодный для оценки параметров. На этом профиле из 30 пунктов опробования в 10 пунктах содержания свинца были сильно аномальными (от  $25 \cdot 10^{-4}$  до 0,5%). Оценка медианы ( $10 \cdot 10^{-4}\%$ ) нами была получена по всем 30 пунктам без исключения аномальных данных. По кумулятивной кривой оценка медианы оказалась равной  $8,7 \cdot 10^{-4}\%$  свинца.

Небезынтересно отметить, что оценка нижнеаномального значения ( $C_A$ ) для уровня значимости 1%, проведенная по методике [17], дала величину  $15 \cdot 10^{-4}\%$  свинца. По более чем 500 точкам на исследуемом планшете содержания более чем  $15 \cdot 10^{-4}\%$  составляют 0,9% точек, что подтверждает правильность расчета  $C_A$  для принятого 1%-ного уровня значимости.

1. Качество исходной геохимической информации должно соответствовать требованиям современной поисковой геохимии. Для этого необходимо использовать по возможности результаты анализов, обладающие необходимыми пределами обнаружения и достаточной правильностью.

2. Первичную обработку исходной геохимической информации целесообразно вести с применением непараметрических и робастных методов, а при принятии решений по результатам обработки шире применять профессиональный анализ.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Айвазян С.А., Бухштабер В.М. Вступительная статья // Дидэ и др. Методы анализа данных. М.: Финансы и статистика, 1985. С. 5-28.
2. Алимов Ю.И. Альтернатива методу математической статистики. М.: Знание, 1980. 64 с.
3. Грекова И.С. Методологические особенности применения прикладной математики на современном этапе развития // Вopr. философии. 1976. № С. 104-114.
4. Инструкция по геохимическим методам поисков рудных месторождений. М.: Недра, 1983. 191 с.
5. Крайнов С.Р., Гудзь З.Г., Закутин В.П. и др. Геохимия селена в подземных водах // Геохимия. 1983. № 3. С. 359-373.
6. Мостеллер Ф., Тьюки Дж. Анализ данных и регрессия. М.: Финансы и статистика, 1982. Вып. I. 220 с.
7. Поллард Д.Ж. Справочник по вычислительным методам статистики. М.: Финансы и статистика. 1982. 344 с.
8. Рунин Р. Справочник по непараметрической статистике. М.: Финансы и статистика, 1982. 200 с.
9. Соловов А.П. Геохимические методы поисков месторождений полезных ископаемых: Учебн. для вузов. М.: Недра, 1985. 294 с.
10. Соловов А.П., Матвеев А.А. Геохимические методы по-

исков рудных месторождений: Учеб. пособие. 2-е изд. М.: Изд-во МГУ, 1985. 232 с.

11. Х о л е н д е р М., В у л ф Д.А. Непараметрические методы статистики. М.: Финансы и статистика. 1983. 344 с.
12. Х ь ю б е р П. Робастность в статистике. М.: Мир, 1984. 304 с.
13. Ч и н и Р.Ф. Статистические методы в геологии. // Решение задач в поле и лаборатории. М.: Мир, 1986. С.180-188.
14. Ш о у Д. Геохимия микроэлементов кристаллических пород. Л.: Недра, 1969. 206 с.
15. Ю ф а Б.Я. Некоторые вопросы применения математической статистики и метрологии при геохимических исследованиях по первичным ореолам. // Материалы III Ленингр. геохим. конф. Л.: ЛТИ, 1969. С.34-36.
16. Ю ф а Б.Я. Влияние погрешности полуквантитативного эмиссионного спектрального анализа на точность оценки основных геохимических характеристик. // Критерии интерпретации первичных геохимических ореолов. М.: ИМПРЭ, 1985. С.100-109.
17. Ю ф а Б.Я., Г у р в и ч Ю.М. Применение медианы и квартилей для оценки нормальных и аномальных значений геохимического поля. // Геохимия, 1964. № 8. С.817-824.
18. Ю ф а Б.Я., Г о л у б е в Н.В., К у з н е ц о в А.Г., Г у б а н о в а Г.Ф. Требования геохимии к метрологическим параметрам аналитических методов и возможности этих методов для геохимических исследований радиоактивных элементов. // Радиоактивные элементы в горных породах. Новосибирск: Наука, 1975. С.237-243.

УДК 550.84.092.2

В.А. Бугров

#### РАЗВИТИЕ ИДЕЙ А.П. СОЛОВОВА ПО КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ГЕОХИМИЧЕСКИХ АНОМАЛИЙ

Познание природной закономерности, впервые установленной и теоретически обоснованной А.П. Солововым еще в 1952 г. [8], определяющей пропорциональную зависимость между продуктивностью коренного оруденения, выведенного на современный уровень эрозийного среза, и продуктивностью его вторичного литохимического ореола рассеяния, внесло коренные изменения в уровень наших знаний о характере формирования геохимического поля и его локальных аномалий.

Зависимости, отражающие пропорциональную зависимость между продуктивностью коренного оруденения и его вторичного ореола, а также между продуктивностью вторичного ореола в элювио-дельте и потока рассеяния в русловых осадках, принадлежат к фундаментальным положениям поисковой геохимии, в значительной мере определяющим методику геохимических съемок и принципы интерпретации получаемых данных. Для количественного выражения этих зависимостей А.П. Солововым были предложены математические формулы, получившие в среде геохимиков-поисковиков

его имя, что отражено в большом количестве публикаций различных исследователей [I-3, 5-7, II-13].

Исключительно важную роль в развитии методов количественной интерпретации вторичных ореолов и потоков рассеяния сыграла монография А.П.Соловова "Основы теории и практики металлометрических съемок" (1959 г.), послужившая импульсом широкому применению геохимиками-поисковиками количественных оценок прогнозных ресурсов оруденения по геохимическим данным на различных стадиях геологоразведочного процесса. Результаты дальнейшего совершенствования методов количественной интерпретации данных геохимических съемок обобщены в работе А.П.Соловова "Геохимические методы поисков месторождений полезных ископаемых", изданной в 1985 г. в качестве учебника для вузов [10], но ставшей, по существу, настольной книгой каждого специалиста-геохимика, посвятившего себя поискам месторождений полезных ископаемых.

Прогнозная оценка ресурсов по геохимическим данным стала обязательной на всех стадиях геологоразведочного процесса - от региональных работ масштаба 1:200 000 (прогнозные ресурсы категории достоверности  $P_3$ ) до предварительной разведки (ресурсы категории  $P_1$  и запасы категории  $C_2$ ). Требования по оценке прогнозных ресурсов вошли в действующую "Инструкцию по геохимическим методам поисков рудных месторождений" [4].

Многие годы в практическом использовании рассматриваемых методов и в достижении высокой геологической эффективности геохимических поисков первенство удерживали геохимики Казахстана [7, 12, 13]. В настоящее время такие достижения имеются практически в любых районах нашей страны [1, 2, 5, 11].

Методы количественной интерпретации геохимических данных широко используются советскими специалистами за рубежом при оказании технического содействия развивающимся странам. Эти методы начали применяться также и некоторыми зарубежными специалистами [6].

В основе количественной интерпретации вторичных ореолов и потоков рассеяния наиболее привлекательной и эффективной является методика решения прямой и обратной задач литохимических поисков. Первая - позволяет рассчитывать ожидаемый вид вторичного ореола, потока рассеяния по заранее заданным параметрам рудного тела и местным геохимическим коэффициентам, а вторая - позволяет по характеристике выявленного вторичного ореола или потока рассеяния оценивать ожидаемые параметры рудного объекта, образовавшего данный поток и вторичный ореол [10]. Фактически это означает, что решение прямой задачи позволяет оптимизировать поисковые сети литохимического опробования при поисках месторождений заданного масштаба, а решение обратной задачи позволяет оценивать прогнозные ресурсы оруденения по характеристикам их вторичных ореолов и потоков рассеяния.

Из успешных примеров, подтверждающих это, можно отметить резуль-

таты применения авиадесантных поисков месторождений по потокам рассеяния в условиях Северо-Востока СССР. Их использование позволяет надежно и в сжатые сроки опосредовать значительные территории (многие десятки тысяч квадратных километров), давать им комплексную прогнозную оценку с подсчетом прогнозных ресурсов металлов (решение обратной задачи), выделять площади для групповой геологической съемки масштаба 1:50 000 и выявлять крупные и средние по масштабам рудные объекты, выведенные на современный уровень эрозионного среза [5, II]. Практическое применение принципов авиадесантной литохимической съемки по потокам рассеяния позволило значительно снизить стоимость работ и трудозатраты на их производство при сохранении высокой геологической эффективности [II].

Как указывает А.П.Соловов, "успех поисковых геохимических съемок зависит от правильной оценки выявляемых аномалий", а "количественная интерпретация данных при региональных, поисковых и детальных литохимических съемках подчиняется последовательному рассмотрению содержания металла в геохимических аномалиях – ореолах и потоках рассеяния, их продуктивностей и ресурсов металла в объектах постепенно возрастающей достоверности" [10]. Все это относится к решению обратной задачи литохимических поисков.

На самых разных стадиях работ решение обратной задачи путем подсчетов продуктивности вторичных ореолов, или потоков рассеяния, существенно облегчает выделение наиболее перспективных в отношении рудности участков для проведения более детальных исследований с подсчетом прогнозных ресурсов металлов различных категорий достоверности в зависимости от характера выполненных работ, а также позволяет классифицировать выявляемые аномалии по очередности их проверки и оценки.

С учетом местных ландшафтно-геохимических условий методика количественной интерпретации вторичных ореолов и потоков рассеяния успешно применяется в самых разнообразных условиях: от таяжно-мерзлотных до экстрааридных пустынных и до влажных тропиков.

Так, при литохимических поисках по потокам рассеяния в условиях Охотско-Чукотского вулканогенного пояса использование приемов решения обратной задачи в совокупности с другими методами позволило на количественной основе устанавливать очередность проверки литохимических аномалий и выявить перспективные участки с проявлениями золота, серебра, олова, молибдена, висмута, вольфрама и локализовать площади для постановки более детальных геологоразведочных работ [5, II].

В экстрааридных условиях Восточной пустыни Египта при литохимических поисках по вторичным ореолам и потокам рассеяния, проведенных с участием советских специалистов, широко использовались методы количественной интерпретации геохимических данных. В результате выполненных работ выявлены новые для этого района Африки типы оруденения:

редкометальное тантало-ниобиевое и бериллиевое в апогранитах, редкометальное в щелочных кольцевых комплексах и сульфидное медно-никелевое в дифференцированных габбро-перидотитовых массивах [2].

Примером литохимических поисков, проведенных в условиях влажных тропиков и выполненных с участием советских специалистов, могут служить работы на территории штата Мадхья Прадеш в Индии, где широко использовались приемы решения прямой и обратной задач количественной интерпретации геохимических данных [6].

Не менее успешно методика количественной интерпретации применяется при поисках по погребенным остаточным ореолам рассеяния, при которых оценки прогнозных ресурсов металлов, выполняемые с учетом палео- и современных ландшафтно-геохимических обстановок, получают хорошее подтверждение по результатам последующего разведочного бурения [7, 12, 13].

Большое значение в дальнейшем развитии методов количественной интерпретации потоков рассеяния имеет введение в практику работ А.П.Соловьевым и Ю.В.Шваровым понятий о "кажущейся" и "истинной продуктивности" литохимических потоков рассеяния [2]. В основу анализа реальных потоков рассеяния положено решение дифференциального уравнения модели процесса, переноса вещества в руслах водотоков, учитывающего источник и состав аллювия, роль в его формировании материала ближайших склонов и динамику выноса рудного элемента из русла, являющегося временным базисом денудации [2]. Такой подход к оценке продуктивности потоков рассеяния, не подчиняющихся теоретической зависимости  $R_x = \text{const}$ , позволяет избегать ошибок в оценке прогнозных ресурсов оруденения.

Задача повышения эффективности геохимических методов поисков месторождений полезных ископаемых в настоящее время стоит достаточно остро. И, как отмечалось на III Всесоюзном совещании по геохимическим методам поисков, " в комплексе геохимических критериев оценки геохимических аномалий важнейшими, безусловно, являются критерии количественной оценки и прежде всего критерии оценки прогнозных ресурсов, выявленных в процессе геологоразведочных работ геохимических аномалий и рудопроявлений" [2].

Одним из резервов повышения эффективности геохимических методов поисков является изучение выявленных, но непроверенных аномалий, число которых приближается к 100 тыс. Из огромного числа непроверенных и нецененных аномалий значительная часть внесена в каталоги без определения их значимости и без установления очередности их проверки, так как для них не проводилась количественная интерпретация. Поэтому важнейшим инструментом в числе других приемов и методик для их интерпретации должны стать количественные методы оценки, базирующиеся на совместном рассмотрении геологических, геофизических и геохимических данных.

Разработанные А.П.Солововым принципы количественной интерпретации вторичных ореолов и потоков рассеяния, являются важнейшей составной частью методики оценки геохимических аномалий. Они должны совершенствоваться и дальше в целях повышения геологической эффективности литохимических съемок.

#### ЛИТЕРАТУРА

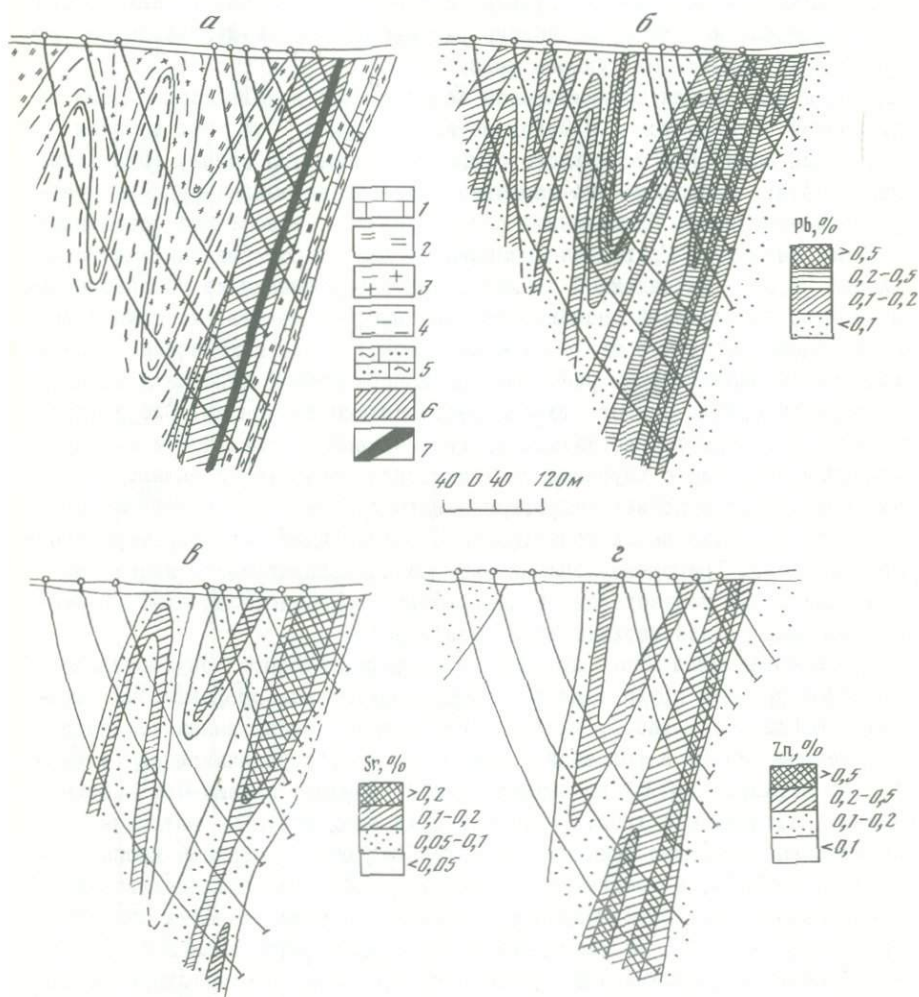
1. Геохимические методы поисков рудных месторождений. Новосибирск: Наука, 1981. Ч.1. 203 с.; 1982. Ч.2. 183 с.
2. Геохимические методы поисков месторождений полезных ископаемых //Тез.докл. III Всесоюз. совещ. М.: ИМГРЭ, 1982. Ч.1. 90 с. Ч.3. 128 с.; Ч.5. 153 с.; Ч.6. 152 с.
3. Геохимические и геофизические методы поисков рудных месторождений на Северо-Востоке СССР. Магадан: СВКНИИ ДВНЦ АН СССР, 1985. 179 с.
4. Инструкция по геохимическим методам поисков рудных месторождений. М.: Недра, 1983. 191 с.
5. Применение геохимических методов поисков рудных месторождений. М.: Недра, 1983. 143 с.
6. Проблемы прикладной геохимии. Новосибирск: Наука, 1983. 164 с.
7. Пути повышения геологической эффективности поисково-разведочных работ на основе дальнейшего совершенствования геофизических и геохимических исследований. Алма-Ата: Госгеолком КазССР, 1965. 132 с.
8. С о л о в о в А.П. К вопросу об оценке перспективности оруденения по результатам металлотрической съемки // Разведка недр. 1952. № 4. С.51-54.
9. С о л о в о в А.П. Основы теории и практики металлотрических съемок. Алма-Ата: изд-во АН КазССР, 1959. 266 с.
10. С о л о в о в А.П. Геохимические методы поисков месторождений полезных ископаемых: Учеб. для вузов. М.: Недра, 1985. 294 с.
11. Стратегия геохимических поисков рудных месторождений. Новосибирск: Наука, 1980. 122 с.
12. Теоретические аспекты миграции элементов-индикаторов рудных месторождений и математические методы обработки геохимической информации. М.: ИМГРЭ, 1974. Ч.1. 92 с.; Ч.2. 80 с.
13. Эффективность геохимических методов поисков рудных месторождений и широкое их внедрение в практику геологической службы СССР. М.: МГ СССР, 1967. 76 с.

ПРОГНОЗНАЯ ОЦЕНКА И ЗОНАЛЬНОСТЬ САУРЕЙСКОГО  
ПОЛИМЕТАЛЛИЧЕСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (ПОЛЯРНЫЙ УРАЛ)

Саурейское барит–полиметаллическое месторождение находится на Полярном Урале в пределах западного крыла Талота–Цайпудинского синклинория Центрально–Уральского поднятия и залегает в толще терригенно–карбонатных пород ордовикского возраста. Рудные тела локализируются в зонах межпластовых нарушений. Наиболее концентрированное оруденение приурочено к контакту карбонатных пород со сланцами, обогащенными углеродистым веществом. Рудные тела имеют пластообразную форму, вытянуты по простиранию и падают под углом  $65-85^{\circ}$ . Основная часть промышленного оруденения приурочена к Главному рудному телу и и незначительная его доля сосредоточена в ряде самостоятельных мелких рудных тел. Главными рудными минералами являются галенит, сфалерит, второстепенными – пирит, халькопирит, бурнонит; жильные минералы представлены баритом, кварцем, альбитом [2]. Зона окисления развита очень слабо; вторичные минералы – церуссит, халькозин, ковеллин. Месторождение сложено богатыми свинцовыми рудами, которые легко обогащаются с получением свинцового концентрата высокого качества, содержащего 73,1% Pb, и только неблагоприятные условия Крайнего Севера не позволяют ему конкурировать с аналогичными месторождениями свинцово–цинковых руд в более доступных для промышленного освоения районах. Поэтому доразведка глубоких горизонтов и флангов месторождения, где по геологическим данным ожидается дополнительный прирост запасов, в настоящее время нерентабельна. Однако, учитывая перспективы района в целом на открытие крупных и средних по масштабу месторождений цветных металлов, изучение геохимической зональности Саурейского месторождения, составление его формализованной модели с реальной оценкой резерва оруденения на глубине – все это имеет первостепенное значение как при поисках и разведке месторождений барит–полиметаллической рудной формации, так и для прогноза рудоносности всего Полярного Урала.

Геохимические особенности Саурейского месторождения изучались по данным опробования 88 скважин, расположенных в 14 разведочных профилях. Обработка результатов геохимического опробования позволила установить следующий комплекс основных рудных и ореолообразующих элементов: свинец, цинк, медь, серебро, барий, стронций, сурьма, мышьяк, марганец, никель, кобальт, молибден. Первичные геохимические ореолы перечисленных элементов исследовались на нескольких вертикальных разрезах. Наиболее ярко они проявлены на разрезе X (рис.1), геологическое строение которого типично для всего месторождения в целом. Первичные ореолы большинства элементов–индикаторов по эффективной ширине намного превосходят рудные тела. Наибольшей эффектив-

ной шириной обладают ореолы основных рудных элементов: свинца - 100-150 м и цинка - 120-200 м. Первичные ореолы остальных элементов типоморфного комплекса по своим морфологическим особенностям повторяют ореолы свинца и цинка, но по эффективным размерам значительно уступают им. О вертикальной протяженности ореолов трудно судить, поскольку они не оконтурены разведочными скважинами, и по существу, выяснены особенности распределения химических элементов только на уровне руд-



Р и с. 1. Геологический разрез (а) и эндогенные ореолы свинца (б) стронция (в) и цинка (г) по профилю X Саурейского месторождения

1 - песчаные известняки; 2 - алевролиты; 3 - алевролиты и алевропесчаники; 4 - переслаивание алевропесчаников, алевросланцев и углистых сланцев; 5 - песчаные известняки, известковистые песчаники; 6 - гидротермально-измененные породы; 7 - рудное тело

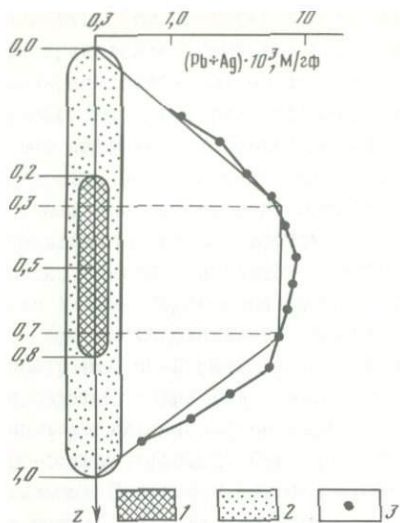
ных тел. Тем не менее в строении ореолов отмечаются черты зонального распределения элементов-индикаторов, что является отражением геохимических особенностей их поведения в процессе рудообразования. Такие элементы, как барий, сурьма, серебро, стронций, мышьяк, образуют весьма широкие и контрастные ореолы преимущественно в верхних частях разреза, на уровне верхних горизонтов рудного тела. Вниз по падению рудных тел ореолы этих элементов резко сужаются. Наиболее резко выклиниваются ореолы серебра, сурьмы, стронция. В отличие от них ореолы меди, никеля, кобальта, молибдена развиваются преимущественно на уровне нижних горизонтов рудного тела.

При исследовании геохимической вертикальной зональности на ЭВМ по программе НЮ-2 (метод А.П.Соловова-А.В.Гаранина [3,4] был выявлен следующий общий ряд зонального отложения элементов (снизу вверх): никель-кобальт-молибден-медь-марганец-цинк-свинец-мышьяк-сурьма-серебро-барий-стронций. Приведенный ряд совпадает с известными зональными схемами Эммонса и Григоряна-Овчинникова для гидротермальных месторождений [1,5]. Для надежной оценки уровней оруденения из установленных на ЭВМ 63 показателей зональности были выбраны девять, которые являются общими для всего месторождения (табл.1). Все показатели характеризуются значительным размахом, равномерностью изменения в рассмотренном интервале рудного тела и геохимически объяснимы. Следует отметить, что характер вертикальной геохимической зональности и закономерное убывание с глубиной геохимических показателей являются важным аргументом в пользу гидротермального генезиса месторождения. Кроме того, сходство рядов зональности с общим рядом для гидротермальных месторождений Григоряна-Овчинникова при однонаправленном изменении значений общих показателей свидетельствует о послескладчатом формировании эндогенной геохимической зональности.

В качестве эталонного профиля, в метрике которого осуществлялась таксация уровней оруденения по другим разведочным профилям, был принят профиль X (см. рис.1, табл.1). Результаты таксирования 46 рудных пересечений из 88 в условной метрике  $0,0-1,0$ , ограничивающей интервал от верхней ( $z=0,0$ ) до нижней ( $z=1,0$ ) границы первичного ореола свинца, приведены в табл.2. Как видно из этой таблицы, величины доверительных пределов среднего  $z \pm s\sqrt{n}$  изменяются в широком диапазоне от 0,25 до 0,78, в среднем составляя  $\pm 0,446$ , что свидетельствует о достаточной надежности полученных оценок (хорошая точность считается при  $\pm s\sqrt{n} \leq 0,5$ ). На месторождении уверенно выделяется интервал с устойчивыми значениями продуктивностей  $M_z = \text{const}$ , соответствующий интервалу условной метрики  $0,3 \leq z \leq 0,7$ . При  $z < 0,3$  и  $z > 0,7$  происходит постепенное уменьшение величины приведенной продуктивности  $M_z = M_1 : M(Pb+Ag)$  до границы верхнего ( $z=0,2$ ) и нижнего ( $z=0,8$ ) выклинивания промышленных руд. Иллюстрацией этому является рис.2, где изображена формализованная модель рудного тела Саурейского месторождения.

Характеристика эталонного профиля X Саурейского месторождения

Номер скважины	Глубина от поверхности, м	z, в условной метрике	Обозначения интервалов рудного тела	$\frac{Ba}{Mo}$	$\frac{Sr}{Cu}$	$\frac{Zn}{Co}$	$\frac{Ba}{Mo}$ $\frac{As}{Co}$	$\frac{Ag}{Ni}$ $\frac{Ba}{Cu}$	$\frac{Ag}{Co}$ $\frac{Sr}{Cu}$	$\frac{Ba^2}{Ni}$ $\frac{Pb}{Pb}$	$\frac{Ag}{Mo}$ $\frac{Zn}{Cu}$	$\frac{Mo}{Co}$ $\frac{Sr}{Cu}$
C-16	112,5	0,18	Надрудный	$2,04 \cdot 10^4$	52,2	$2,6 \cdot 10^2$	$1,8 \cdot 10^5$	$2,7 \cdot 10^3$	133	$3,1 \cdot 10^5$	$1,2 \cdot 10^3$	$9,81 \cdot 10^6$
C-18	185	0,26	Верхнерудный	$1,01 \cdot 10^4$	17,5	$1,89 \cdot 10^2$	$8,85 \cdot 10^4$	735	32	$5,02 \cdot 10^3$	202	$6,7 \cdot 10^5$
C-99	255	0,38	"	$4,9 \cdot 10^3$	6,95	87,2	$3,94 \cdot 10^4$	714	5,9	$4,3 \cdot 10^3$	19,6	$2,5 \cdot 10^4$
C-136	330	0,51	Среднерудный	$4,5 \cdot 10^3$	5,27	48,5	$1,18 \cdot 10^4$	500	3,8	$3,7 \cdot 10^3$	10,4	$1,0 \cdot 10^4$
C-48	380	0,64	Нижнерудный	$3,2 \cdot 10^3$	3,3	36,4	$9,5 \cdot 10^3$	140	3,4	$2,7 \cdot 10^3$	9,9	$6,3 \cdot 10^3$
C-38	485	0,76	"	$1,04 \cdot 10^3$	1,43	25,0	$2,6 \cdot 10^3$	42,5	1,01	$2,5 \cdot 10^2$	1,68	$1,02 \cdot 10^3$
C-256	565	0,84	Подрудный	309	2,89	12,5	709	15,1	0,8	29,0	1,21	921
C-255	692	0,89	"	78,1	0,95	6,82	122	1,48	0,21	8,6	0,17	78,2



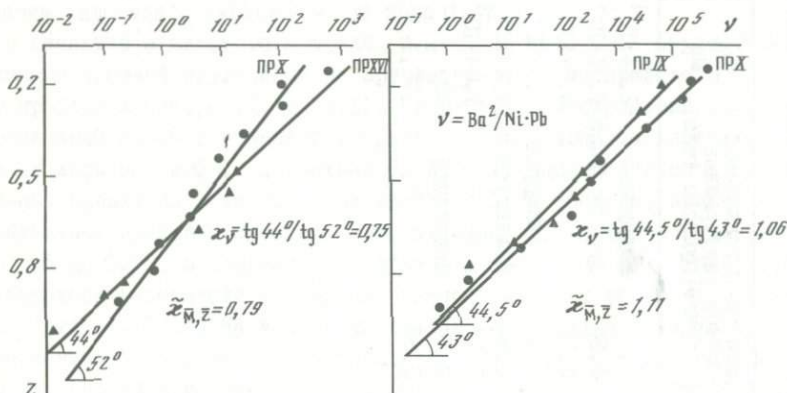
Р и с . 2. Формализованная модель рудного тела Саурейского месторождения

1 - рудное тело; 2 - первичный ореол; 3 - значения приведенной линейной продуктивности по разведочным профилям У1-У1Х

При оценке протяженности оруденения на глубину и подсчете прогнозных ресурсов месторождения использовались показатели подобия  $\alpha \leq 1,0$ . Определение значений  $\alpha_M$  и  $\alpha_H$  проводилось по всем разведочным профилям в метрике эталонного профиля X, параметры которого были приняты за единицу.

Коэффициент  $\alpha_H$  оценивался на основании сопоставления протяженности интервала  $z=0,2-0,8$  в каждом профиле

с эталонным. Одновременно оценивая  $M_z = \text{const}$  по графикам  $M_z = f(z)$  для свинца и суммы свинца, серебра в геонах в интервале промышленных руд, имеем определения  $\alpha_M$  в каждом профиле. Между этими независимыми определениями  $\alpha_M$  и  $\alpha_H$  установлена хорошая сходимость (табл.3). Найденные средние геометрические значения коэффициентов подобия по 12 разведочным профилям изменяются от 0,75 (перезим рудного тела) до 1,3 (раздвиг рудного тела). Для контроля оценивался  $\alpha = \frac{tg \alpha_1}{tg \alpha_2} \cdot 1$  путем построения графиков  $v_z = f(z)$ , где  $\alpha_1, \alpha_2$  - соответствующие углы, образованные осредненными кривыми  $z$  с осью абсцисс (рис.3).

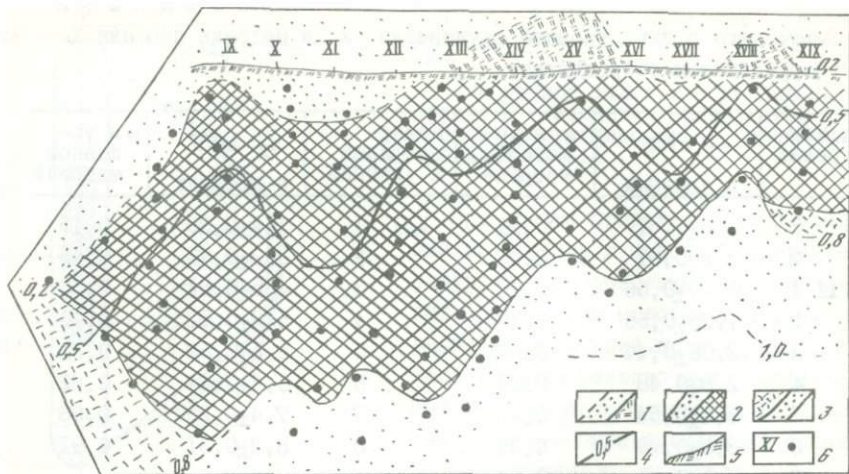


Р и с . 3. Графики показателей зональности для оценки коэффициентов подобия на примере Саурейского месторождения

Результаты оценки уровней оруденения  $z$  в метрике профиля X  
(Саурейское месторождение)

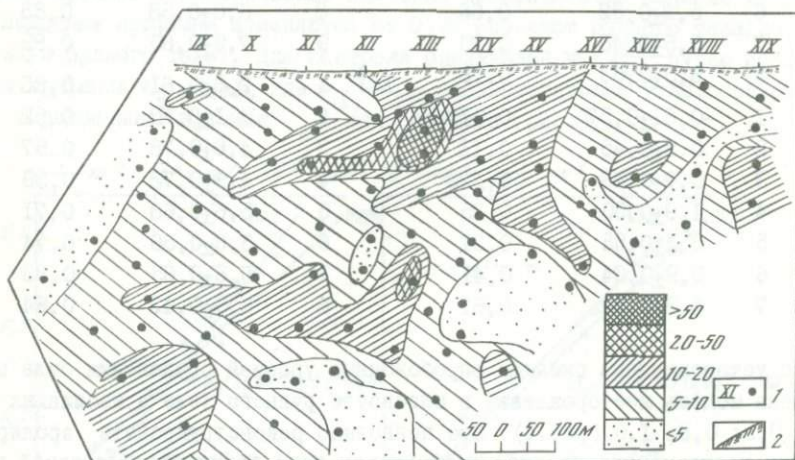
Профили и уровни	$z \pm s/\sqrt{n}$ в уровнях	$z$ в ус- ловной метрике	Номер профилей и уровней	$z \pm s/\sqrt{n}$ в уровнях	$z$ в ус- ловной метрике	
VII I	1,6±0,41	0,21	XII I	1,4±0,39	0,19	
	2,2±0,61	0,47		2	3,2±0,73	0,45
VIII I	0,77±0,56	0,13	XIII I	4,5±0,54	0,57	
	1,25±0,55	0,17		3	5,2±0,52	0,70
	2,05±0,44	0,27		4	5,5±0,52	0,81
	2,8±0,48	0,36		5	6,7±0,44	0,82
	3,4±0,54	0,43		6	7,4±0,25	0,86
	3,8±0,49	0,49		7	8,2±0,31	0,91
	5,0±0,45	0,64		8	2,3±0,69	0,30
	5,1±0,49	0,65		2	2,4±0,68	0,31
IX I	0,5±0,52	0,11	XIV I	3,7±0,49	0,47	
	1,4±0,46	0,19		3	4,4±0,59	0,56
	2,3±0,46	0,29		4	4,9±0,78	0,62
	3,4±0,39	0,43		5	5,6±0,54	0,64
	4,2±0,39	0,54		6	6,7±0,59	0,82
	5,2±0,32	0,66		7	6,8±0,58	0,83
	5,5±0,48	0,70		8	7,9±0,60	0,89
	6,5±0,53	0,78		9	2,8±0,61	0,36
XI I	-0,61±0,57	0,013	XIV I	4,1±0,73	0,52	
	0,5±0,45	0,11		2	4,6±0,78	0,57
	0,7±0,43	0,128		3	4,9±0,73	0,59
	1,9±0,50	0,25		4	5,6±0,68	0,71
	3,4±0,55	0,31		5	5,8±0,56	0,74
	3,9±0,34	0,41		6	6,8±0,65	0,83
	5,8±0,42	0,61		7	6,9±0,42	0,84

По установленным оценкам опробованных уровней оруденения была построена модель месторождения в плоскости рудного тела в изолиниях  $z = 0,2; 0,5; 0,8; 1,0$  (рис.4). Это позволило реконструировать эродированную часть месторождения, оказавшуюся выше современной дневной поверхности. Часть модели ниже разведанного интервала определила резерв оруденения. Одновременно по всем имеющимся скважинам и разрезам Саурейского месторождения в интервале разведанных горизонтов были построены значения продуктивностей суммы свинца и серебра (в метрогеофонах) в плоскости рудного тела (рис.5). Поля максимальных значений продуктивностей четко оконтуривают интервалы промышленных руд ( $z=0,2-0,8$ ) и отражают восточное склонение рудного тела, отмечающееся в по-



Р и с . 4. Разрез Саурейского месторождения в плоскости рудного тела с реконструкцией эродированной части и прогнозом резерва на глубину

I - интервал, уничтоженный эрозией; 2 - разведанная часть месторождения; 3 - резерв оруднения на глубину; 4 - изолинии условной метрики 0,0-1,0; 5 - современная дневная поверхность; 6 - разведочные профили и скважины



Р и с . 5. Распределение суммы свинца и серебра в геофонах в разрезе Саурейского месторождения

I - номер разреза и точка пересечения рудного тела скважиной; 2 - дневная поверхность

гружении изолиний  $z$  -0,2; 0,5; 0,8 с северо-запада на юго-восток. По этим данным предполагается выклинивание оруденения в северо-западном направлении и можно прогнозировать наличие кондиционных руд на юго-восточном фланге месторождения (профили I-VI) на глубине 700 м и более, что не противоречит имеющимся геологическим данным. В результате подсчета общих запасов свинца

Т а б л и ц а 3  
Коэффициенты подобия  $\mathcal{E}$  по разведочным профилям

Профиль	$\mathcal{E}_{\text{Pb}}^{\text{M}}$	$\mathcal{E}_{\text{Pb+Ag}}^{\text{M}}$	$\mathcal{E}_{\text{M}}$	$\mathcal{E}_{\text{H}}$	$\mathcal{E}_{\text{Mz}}$	$\epsilon \pm 1$
VII	0,91	0,79	0,85	1,13	0,98	1,19
VIII	1,12	0,98	1,05	1,05	1,05	1,05
IX	1,24	0,91	1,06	1,17	1,11	1,06
XI	1,43	1,26	1,31	1,08	1,19	1,13
XII	0,89	0,85	0,87	1,04	0,95	1,12
XIII	1,61	1,36	1,48	1,14	1,30	1,17
XIV	0,99	0,85	0,92	0,94	0,93	1,01
XV	1,37	1,25	1,31	0,92	1,09	1,25
XVI	1,04	0,71	0,86	0,73	0,79	1,11
XVII	1,03	0,89	0,96	0,58	0,75	1,37
XVIII	1,26	1,08	1,17	0,61	0,84	1,50
XIX	1,14	1,02	1,08	0,63	0,82	1,40

месторождения (профили IX-XIX) определена величина поправочного множителя  $\alpha$ , учитывающего долю забалансовых руд, как  $\alpha = \frac{M_{\text{конд}}}{M_{\text{общ}}} = 0,72$ .

Подсчеты количества свинца  $M_{\text{конд}}$  проводились в контуре изолиний 0,2-0,8, а полные прогнозные геохимические запасы свинца  $M_{\text{общ}}$  - в контуре изолиний 0,0-1,0. Данные об уровне эрозионного среза и значениях  $\mathcal{E}$ , отдельных мелких рудных тел и рудопроявлений позволяют провести оценку их прогнозных ресурсов (табл.4).

Как следует из табл.4, наибольший поисковый интерес представляют рудопроявления Цинковое, Орангское, расположенные в южной части Саурейского рудного поля. Уровень эрозионного среза рассматриваемых рудопроявлений оценивается в метрике Саурейского месторождения как верхнерудный: в одном случае - близкий к верхней границе промышленного оруденения (Орангское рудопроявление), в другом - к среднерудному уров-

Т а б л и ц а 4  
Результаты оценки отдельных рудных объектов в метрике Саурейского месторождения

Объект	$\mathcal{E}_{\text{M}}$	$z \pm \sigma/\sqrt{n}$	Q усл.ед.
Рудное тело № 3	0,32	0,58 $\pm$ 0,44	0,012
Рудное тело № 4	0,18	0,68 $\pm$ 0,39	0,0012
Рудное тело № 5	0,17	0,70 $\pm$ 0,41	0,00084
Рудное тело № 6	0,21	0,65 $\pm$ 0,45	0,0023
Рудное тело № 8	0,30	0,52 $\pm$ 0,35	0,0015
Орангское	0,43	0,25 $\pm$ 0,50	0,074
Цинковое	0,35	0,38 $\pm$ 0,40	0,03
Новое	0,36	0,62 $\pm$ 0,43	0,014

ню (Цинковое рудопроявление). Рудные тела имеют линзовидную форму, содержание свинца и цинка соответственно для первого - 11,64 и 0,45%, для второго - 2,52 и 0,91%. Поскольку для слабоэродированных рудопроявлений предполагается увеличение интенсивности оруденения с глубиной до промышленных кондиций, то с целью дальнейшей оценки этих рудопроявлений, определения мест заложения буровых скважин и выявления новых слепых рудных тел рекомендуется детальная литохимическая съемка масштаба 1:10 000 в пределах южной части Саурейского рудного поля.

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. По данным геохимического опробования разведочных скважин установлена четкая вертикальная зональность Саурейского свинцово-цинкового месторождения; предложены геохимические показатели зональности, имеющие важное практическое значение для прогнозной оценки новых рудных объектов.

2. На основе принципа подобия и геохимических показателей зональности определены уровни оруденения Саурейского месторождения, построены его формализованная модель и разрезы в плоскости рудного тела с реконструкцией эродированной части и оценкой резерва на глубине. Значительными резервами характеризуются глубокие горизонты юго-восточно-го фланга Саурейского месторождения (свыше 700 м).

3. Полученные результаты исследования геохимической зональности эталонного месторождения (Саурейского) позволят в его метрике проводить оценки уровней эрозионного среза, глубины распространения руд, подсчеты прогнозных ресурсов свинцово-цинковых руд при поисковых геохимических работах в пределах Полярного Урала.

## Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Барсуков В.Л., Григорян С.В., Овчинников Л.Н. Геохимические методы поисков рудных месторождений. М.: Наука, 1981. 321 с.
2. Домчак В.В., Худяков А.П. Условия локализации свинцово-цинковых руд на Полярном Урале //Сов.геология. 1973. № 3. С.34-42.
3. Соловов А.П. Интерпретация данных при литохимических поисках //Проблемы прикладной геохимии.Новосибирск:Наука, 1983.С.58-67.
4. Соловов А.П. Геохимические методы поисков месторождений полезных ископаемых:Учеб.для вузов.М.:Недра, 1985. 294 с.
5. Эммонс В.Х. Изменение первичного оруденения с глубиной. М.: Госгеолгиздат. 1933. 40 с.

К МЕТОДИКЕ ИЗУЧЕНИЯ ЭНДОГЕННЫХ ГЕОХИМИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ  
ПОЛИФОРМАЦИОННОГО ОРУДЕНЕНИЯ

История изучения эндогенных геохимических ореолов с целью поисков скрытого оруденения и оценки глубоких горизонтов месторождений насчитывает более трех десятилетий. Метод поисков по эндогенным геохимическим ореолам сводится к изучению эталонных объектов, характерными для которых являются зональное размещение минеральных ассоциаций и зональное строение эндогенных геохимических ореолов. Последующим этапом поисков является сравнительная оценка выявленных эндогенных аномалий с показателями эталонных объектов. Было замечено, что сходимость полученных количественных оценок выявленного оруденения с результатами последующей разведки являлась удовлетворительной при наличии в пределах ореола (аномалии) одного-двух рудных тел. При резком увеличении количества рудных тел результаты оценок становились неопределенными [5]. Поэтому изучение геохимическими методами сложно построенных объектов потребовало нового подхода.

Напомним, что рудное тело и эндогенный геохимический ореол представляют собой единое целое, возникшее как следствие суммарного результата ряда явлений, имеющих существенное значение в формировании рудных тел и ореолов, а также проявления в них контрастной зональности [4]. Рудная зональность выражается в виде зональности отложения, описанной Ю.А.Билибиним, а также пульсационной зональности, установленной С.С.Смирновым [1].

Зональность отложения проявляется в отдельном рудном теле, образовавшемся в одну стадию рудотложения. Пульсационная зональность обусловлена неравномерным распределением минеральных ассоциаций, отложенных в разные стадии минералообразования. Такая зональность характерна для группы рудных тел, формирование которых происходило в длительный промежуток времени.

Последовательное развитие минеральных и отвечающих им элементных ассоциаций происходит на фоне меняющихся во времени и пространстве рудного узла структурно-геологических условий, связанных с эволюцией рудоконтролирующих трещинных структур. Поэтому при изучении рудных полей мы сталкиваемся обычно со сложными проявлениями разных видов зональности, суммарный характер которой находится в прямой зависимости от особенностей эволюционного развития структурного плана конкретного объекта.

Разностадийным рудным обособлениям сопутствуют собственные элементные ассоциации. При этом элементы каждой предыдущей стадии при проявлении процессов последующей стадии минералообразования испытывают частичную перегруппировку с изменением минеральных форм и развитием

нового рисунка зональности. В результате неоднократного изменения структурного плана рудного узла и длительного многоступенчатого накопления вещества с изменением во времени и пространстве положения источников и векторов движения рудоносных растворов получаются сложные интегральные эндогенные геохимические поля. Рисунок общей зональности в таком интегральном поле становится настолько сложным, что геохимические построения по традиционным методикам на основе закономерностей первичных ореолов заведомо приводят к ложным построениям и неправильным выводам, так как геохимические построения делаются на основе не эталонных, а собственных закономерностей пространственного распределения химических элементов, возникших в результате поступления в область рудоотложения нескольких волн гидротермальных растворов и частичной перегруппировки (регенерации) рудного вещества.

К наиболее важной характеристике сложных геохимических полей следует отнести их структуру, проявляющуюся в характере распределения главных и сопутствующих ассоциаций химических элементов, определяемом в первую очередь физико-химическими свойствами субстрата и изменением состава, концентрации и вектора движения рудообразующих растворов во времени. Особенностью строения геохимических полей рудных узлов является наличие в их пределах рудных центров и вокруг них - геохимических полей более низкого порядка, формирующихся в соответствии с этапами и стадиями процесса рудообразования. Такие аномальные поля характеризуются качественно или количественно различным элементным составом, различной ориентировкой в пространстве. Рудные центры, как правило, разобщены в пределах аномального геохимического поля как по площади, так и по вертикали, а аномальные поля вокруг этих центров обычно совмещены в пространстве своими различными частями. При этом совмещение подрудных частей одного поля может быть совмещено с надрудными частями другого аномального поля. Примером могут служить месторождения Юрэд и Гендерсон, где рудная минерализация обособлена на двух гипсометрических уровнях, или месторождение Бьэтт, на котором мощные жильные системы сменяются на глубине молибден-порфировой минерализацией [3].

Интерпретация и разбавка эндогенных геохимических полей такого рода требуют разработки соответствующих методик как опробования рудного вещества, так и обработки геохимической информации. Значительный вклад в это направление может быть внесен исторической геохимией геологических образований исследуемых объектов. Иными словами, необходим переход к методике исследования геохимии элементов в динамике. На это в свое время указывал А.И.Кривцов и И.Т.Макеева [2], рассматривая проблему регенерационного рудообразования.

С.В.Григорян [1] отмечал, что во избежание ошибок при оценке аномалий следует учитывать целый комплекс критериев, в том числе геохимические особенности каждого процесса. Методические приемы опробова-

ния и специфика самого спектрального анализа предполагают исследование валового элементного состава материала. По результатам анализов мы получаем суммарное количество элемента, в которое входит, например, вольфрам из попавших в пробу высокотемпературных вольфрамитов и низкотемпературных купротунгститов (вольфрамовых охр). Или в суммарное количество молибдена может войти молибден из находящегося в материале пробы высокотемпературного молибденита и молибдена, осажденных из циркулирующих с боковых пород растворов. Таким образом, в пробе анализируется обычно некоторое стационарное состояние — статистическая картина современного распределения элементов в рудном поле, не учитывающая ни динамики процесса, ни его генезиса. Пользуясь статистическими данными, геологи-геохимики упростили, или, можно сказать, облекчили себе задачу геохимического анализа, сделав его приложением минералогического анализа. Но еще А.Е.Ферсман [7] предупреждал, что статистическая правильность построений недостаточна для полного применения общих положений к каждому данному случаю. Переход к геохимическому анализу (элементному уровню изучения вещества, чем и занимается геохимия) обязывает исследователя делать выводы, одинаково опираясь как на вещество, из которого состоит объект, так и на пути его образования (выявление закономерностей миграции вещества во времени и пространстве).

Методика проведенных нами исследований на одном из месторождений порфирирового типа базировалась на совершенно новой позиции, когда исследованию подвергались не эндогенные ореолы, а геохимические поля. В основу изучения была положена методика исследований геохимии элементов в динамике их поведения в рудно-магматическом процессе. Месторождение представляет собой трубчатое концентрически-зональное брекчиевое сооружение, сопровождающееся субвулканическими интрузиями, гидротермально-метасоматическим преобразованием и рудным штокверком. По времени образования интрузивные породы и связанная с ними рудная минерализация могут быть разделены на пять этапов.

1. Формирование воронкообразного тела грубообломочных взрывных брекчий с последующими интенсивными процессами калишпатизации, окварцевания, пиритизации, флюоритизации и фенакит-бертрандитового оруденения.

2. Внедрение по конической-кольцевой системе трещин даек микрогранитов, трахириолитовых порфириров и граносиенит-порфириров с одновременной "пропиткой" магматическим материалом вмещающих пород [6], названных В.Л.Верняком "периферическими" брекчиями. Образование "периферических" брекчий и даек сопровождалось формированием бериллий-молибденового оруденения.

3. Образование на месте центрального выводного канала некка, выполненного эруптивными брекчиями трахириолитовых порфириров. Цемент и обломки брекчий изменены процессами натриевого метасоматоза.

4. Внедрение интрузии (в форме ветвящихся крутопадающих даек, приуроченных к ядру структуры) мелко-среднезернистых, иногда порфировидных гранитов.

5. Внедрение даек эгириновых гранитов и формирование кварц-микрклиновых пегматитов сопровождалось образованием кварц-анатазовой и алюмофторидной минерализации.

Учитывая многоэтапность магматических и рудных проявлений и приняв за основу описанную выше схему последовательности геологических образований, мы задались целью проследить формирование эндогенных аномальных полей в возрастной последовательности по указанным выше этапам минералообразования. Для этого необходимо было проследить, какие элементы и в каком количестве сопутствовали становлению того или иного геологического образования. По керну скважин было проведено специальное минералого-геохимическое картирование с отбором литологических проб по методике дифференцированного опробования. Такому опробованию подвергались все разновидности прожилков и вмещающей минерализации, участвующих в формировании аномальных геохимических полей. В одну пробу попадал материал только одного прожилка или материала вмещающей породы с интенсивной вмещенностью либо пирита, либо молибденита. Часто материал пробы выпиливался алмазной пилой из штуфа. При отборе проб выполнялось требование строгой привязки опробуемых разновидностей минерализации к относительному периоду их образования и к пространству рудного поля. Кроме того, материал пробы должен был отражать единственный акт минерализации в рудно-магматическом процессе.

По результатам анализов проб, отобранных по указанной методике, были составлены выборки, отображающие элементный состав всех разновидностей литологических образований и всех типов рудной минерализации.

Для сравнения степени накопления химических элементов по типам минерализации и по разновидностям пород мы воспользовались значениями величин коэффициентов геохимической концентрации, представляющими собой отношение содержания элемента в минеральном образовании к фоновому значению элемента во вмещающей данное минеральное образование породе. Как видно из таблицы, геохимические особенности последовательного возрастного ряда кварц-молибденитовых, кварц-молибденит-пиритовых, кварцевых прожилков и галенит-сфалеритовой минерализации показывают эволюцию состава рудообразующих растворов от стадии к стадии и отражают, в свою очередь, сложность последовательного формирования многоэлементных геохимических полей. Эта последовательность выразилась в сквозном накоплении бериллия и молибдена на всех этапах рудно-магматического процесса, в образовании аномальных полей серебра, олова, иттрия, кобальта и кадмия в средние, а свинца, цинка, церия, лантана, ниобия, а также вольфрама, меди, хрома и бария в конечные этапы магмо- и рудообразования. При этом визуально наблюдаемыми признаками аномальных полей четырех последних элементов являются самые поздние разновидности прожилкового кварца.

Характеристика относительного накопления элементов по типам минерализации  
и по разновидностям пород вулкано-купольной постройки

Разновидности пород	Характер минерализации																
	Площадная калишпатизация				Окварцевание по линейным зонам				Прожилки кварц-молибденитового состава								
	Относительное накопление элементов в коэффициентах концентрации																
I	Be	Li	Mo	W	Be	Li	Mo	W	Be	Mo	Li	W	Ag	I	Bi	Cu	Sn
I	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Граносиениты, граниты	Информация отсутствует				1000	4	200	14	30	5200	-	-	-	-	-	-	-
Эксплозивные брекчии	1300	5	620	13	600	-	350		8	4700	-	-	-	-	-	-	
Периферические брекчии	-	-	-	-	-	-	-	-	80	2000	6	9					
Дайки трахитов, трахилипаритов, граносиенит-порфиров	-	-	-	-	-	-	-	-	80	4000	3	13	-	-	-	-	
Эруптивные брекчии	-	-	-	-	-	-	-	-	130	3000	10	15	10	4	-	-	
Дайки мелкозернистых лейкократовых гранитов	-	-	-	-	-	-	-	-	-	600	-	-	10	8	700	100	3
Кварц-полевошпатовые пегматиты	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

Характер минерализации																																			
Прожилки кварц-молибденит-пиритового состава									Прожилки кварц-пирит-флюоритового состава									Галенит-сфалеритовая минерализация																	
Относительное накопление элементов в коэффициентах концентрации																																			
Be	Zi	Mo	Co	Ag	Bi	J	Cd	W	Be	Zi	Mo	Ag	W	J	Pb	Ce	Zn	Za	Bi	Ca	Ag		Zn	Sn	W	Za	Zi	Mo	J	Ce	Nb				
19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50				
5	-	5000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
6	5	7300	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
-	5	22	3	-	-	-	-	-	9	4	107	-	9	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
4	5	1300	7	100	100	4	500	-	Информация отсутствует										-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	10	900	17	100	500	6	1000	14	100	8	670	50	8	6	20	5	50	3	3000	1000	20	80	40	9	47	3	3	667	-	-	-				
-	-	5	50	50	2000				Информация отсутствует										-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10	10	8	27	8	5	12	16	8	8				

Характер минерализации  
Прожилки кварца

Относительное накопление элементов в коэффициентах концентрации

Zi	Cd	Ag	Mo	Bi	Pb	Zn	W	Wb	J	Zr	Ni	Za	Cu	Cr	Ba	Ce	Be	Sn
51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
15	50	8	230	100	4	9	80	-	7	6	-	-	-	-	-	-	-	-
3	150	10	260	90	3	-	6	-	8	6	-	-	-	-	-	-	-	-
7	1000	50	833	1000	6	60	60	10	3	3	5	3	7	10	10	3	9	5
3	100	10	47	500	-	6	55	-	3	3	67	-	6	8	10	3	-	-
5	-	-	320	400	40	12	26	10	6	3	5	10	3	5	4	5	20	15

Многоэтапное формирование концентрически-зональной структуры обусловило неоднократное выполнение трещин минеральными образованиями идентичного состава, но различающимися геохимическими признаками. Это предопределило, в свою очередь, неоднократное формирование многоэлементных геохимических полей, находящихся между собой в сложных пространственных и временных отношениях. Изучение таких полей на основе методики дифференцированного опробования позволило создать вариант модели распределения в трехмерном пространстве разновременных геохимических аномальных полей. Более ранние геохимические поля сформированы преимущественно на верхних горизонтах месторождения по периферическим частям вулкано-купольной постройки (бериллий, молибден). Более поздние геохимические поля (серебро, олово, иттрий, кобальт и кадмий) оказались сформированными ближе к центральным частям постройки, тяготея к ее выводному каналу. Самые поздние геохимические поля (свинец, цинк, церий, лантан, ниобий, вольфрам, медь и хром) фиксируются на гипсометрически нижних горизонтах структуры, тяготея к ее ядру.

По поведению в рудно-магматическом процессе элементы делятся на две группы. Первая группа элементов, к которой относятся бериллий, молибден, висмут и вольфрам, характеризуется двумя максимумами накопления - в начальные и конечные стадии процесса минералообразования. Вторая группа элементов, к которой относится кадмий, серебро, цинк, свинец, иттрий, церий, ниобий, хром, медь и вольфрам, имеют тенденцию к накоплению в конечные стадии минералообразования. Формирование на нижних горизонтах вулканической постройки геохимических полей второй группы элементов приводит к выводу о наличии на глубине второго яруса оруденения, локализованного в купольной части, не вскрытого эрозией интрузивного тела гранитоидов. Это предположение теоретически согласуется с представлениями Р. Силлитое, по которым большинство известных порфирировых месторождений являются различными частями рудно-магматических систем, вертикальный размах которых достигает  $\approx 7$  км [3]. Таким образом, анализ модели объемного распределения многоэтапных геохимических полей приводит к выводу, что в опоскованной части вулкано-купольной постройки мы имеем дело с суммарными, наложенными в пространстве и во времени аномальными полями, одни из которых выведены на поверхность на уровне промышленного молибден-бериллиевого оруденения, а другие фиксируют верхние надрудные части скрытого на глубине второго яруса оруденения.

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Григорян С.В. Первичные геохимические ореолы при поисках и разведке рудных месторождений. М.: Недра, 1987. 408 с.
2. Кривцов А.И., Макеева И.Т. Источники рудного вещества эндогенных месторождений. //Итоги науки и техники. Рудные месторождения. М.: ВИНТИ, 1981. Т.2. С.124-132.

3. Кривцов А.И., Мигачев И.Ф., Попов В.С. Медно-порфировые месторождения мира. М.: Недра, 1986. 235 с.
4. Овчинников Л.Н. Механизм и условия образования первичных геохимических ореолов. // Геохимические методы при поисках месторождений олова, вольфрама и ртути. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1975. С.4-6.
5. Пальгуева М.Ф. Опыт применения геохимического метода количественной оценки оловянного оруденения по первичным ореолам в Кавалеровском рудном районе. // Там же. С.50-51.
6. Скрипкина В.В., Верник В.Л., Рейф Л.И. и др. Новая вулканическая структура с молибденовой минерализацией в Западном Забайкалье. // Докл. АН СССР. 1986. Т.264, № 6. С.1461-1464.
7. Ферсман А.Е. Геохимия. Л.: ОНТИ, 1939. Т.4. 492 с.

УДК 550.84:553.493.5

Ю.А.Новиков, Л.Н.Новикова

#### ВЫЯВЛЕНИЕ ПОГРЕБЕННЫХ КАРБОНАТИТОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПО ВТОРИЧНЫМ ОРЕОЛАМ РАССЕЯНИЯ

Одной из актуальных проблем поисковой геохимии в настоящее время является разработка методики поисков погребенных (перекрытых чехлом молодых осадочных отложений) рудных месторождений путем выявления вторичных наложенных (солевых) литохимических ореолов в почвах. Исследованиями группы авторов (Л.В.Антропова, Н.И.Несвижская, Ю.Е.Саэт и др.) созданы основы методики поисков погребенного полиметаллического оруденения по наложенным ореолам. В данной статье излагаются результаты работ по изучению вторичных наложенных литохимических ореолов погребенного (на глубину до 100 м) апатит-редкометалльного месторождения.

Месторождение расположено в зоне тектоно-магматической активизации в кристаллических породах докембрия и принадлежит к карбонатитовой формации линейных зон. В пределах этой зоны серия субмеридиональных долгоживущих глубинных разломов ограничивает наложенную впадину типа грабена, выполненную осадками мела, палеогена и неогена. Оруденение приурочено к одному из глубинных разломов, который ограничивает впадину на востоке. Карбонатиты и вмещающие их породы принадлежат к раннепротерозойскому комплексу ультраосновных и щелочных пород и карбонатитов. Месторождение представлено серией линейно-вытянутых субвертикальных кулисообразных тел карбонатитов с окаймляющими их карбонатизированными фенитами. Карбонатиты и рудовмещающие породы, а также их глинистые коры выветривания, перекрыты отложениями нижнемелового-четвертичного возраста мощностью 80-100 м.

Несмотря на большую мощность экранирующих оруденение молодых осадочных отложений, ряд факторов обуславливает формирование в почвах солевых литохимических ореолов рассеяния.

Элементами-индикаторами апатит-редкометалльного карбонатитового оруденения являются фосфор, ниобий, тантал, цирконий, редкие земли (главным образом лантан и церий), стронций, барий и молибден.

В связи с высокой устойчивостью в зоне гипергенеза апатита, циркона, бадделеита, колумбита и фергусонита – главных концентраторов фосфора, циркония, ниобия и тантала в карбонатитах – нет оснований ожидать солевых ореолов рассеяния этих элементов.

Редкоземельные элементы в карбонатитах содержатся в нескольких формах: они концентрируются в устойчивых в зоне гипергенеза апатите, монаците, фергусоните и изоморфно входят в кальцит и доломит. С карбонатами карбонатитов связано 33–65% суммы окислов редкоземельных элементов и бария. Энергичное выщелачивание и растворение карбонатов в водах в зоне гипергенеза обуславливает переход в растворенное состояние редкоземельных элементов и бария с последующей миграцией их в растворенной форме (ионной и комплексной).

К числу геологоструктурных условий, благоприятных для формирования в мезо-кайнозойских отложениях и почвах региона экзогенных солевых ореолов, следует отнести: 1) широкое развитие разрывных нарушений (особенно постмеловых и кайнозойских) как путей циркуляции водных растворов с аномальными содержаниями лантана, церия и бария; 2) высокую линейную продуктивность редкометалльного оруденения, обусловленную большой мощностью тел карбонатитов и довольно высоким содержанием в них редкоземельных элементов; 3) континентальный характер неоген-четвертичных отложений.

Реализация минерало-геохимических и геологоструктурных предпосылок для формирования солевых ореолов возможна лишь при наличии соответствующих ландшафтно-геохимических условий – геохимических барьеров [2].

Геохимические ландшафты региона принадлежат к сухостепным ландшафтам нейтрального (кальциевого) класса водной миграции. Анализы почв, а также грунтовых и поверхностных вод района свидетельствуют о том, что геохимическая обстановка этих ландшафтов окислительная, нейтральная. Поверхностные и грунтовые воды района гидрокарбонатно-сульфатные и сульфатно-гидрокарбонатно-хлоридные магниево-кальциевые, pH 7,0–7,4. В ландшафтах региона возможно выделение непосредственно в поле участков с проявлениями нескольких геохимических барьеров; испарительного, кислородного и сорбционного. Полуаридность климата региона, характеризующегося преобладанием испарения над количеством выпадающих осадков, а также хлоридно-сульфатное засоление почв (с развитием белых выцветов и налетов солей в них), обеспечивает проявление испарительного геохимического барьера [2]. Проявления кислородного

барьера, формирующегося при смене восстановительных условий окислительными, выражены характерными признаками гипергенного ожелезнения (линзы и пятна ржаво-бурого цвета). Существенно глинистый (каолинит, монтмориллонит, гидрослюда) состав почвенных горизонтов В и ВС почв и неогеновых отложений обуславливает реальность сорбированной формы нахождения ореолообразующих элементов.

С целью выявления и изучения вторичных ореолов рассеяния элементов-индикаторов карбонатитового месторождения были проведены: наземная площадная литохимическая съемка участка месторождения (в масштабе 1:25 000); изучение разрезов почвенно-элювиальных образований с погоризонтным опробованием их; ландшафтно-геохимическое картирование; систематическое геохимическое опробование неогеновых отложений; гидрохимическое опробование и литохимическое опробование аллювиальных отложений.

Литохимическое опробование неогеновых отложений, выполненное из обнажений и расчисток, позволило выявить контрастные вторичные ореолы рассеяния карбонатитового месторождения. Они представляют комплексные полиэлементные ореолы лантана, церия и бария, которые развиваются непосредственно над крупными телами карбонатитов либо смещены относительно их на 100-200 м. Интенсивность ореолов лантана и церия составляет 0,005-0,12%, а бария - 0,05-0,15%. Показатели контрастности [3] этих ореолов колеблются от 3,7 до 10,7.

В результате литохимического опробования на уровне горизонтов В и ВС почвенно-элювиальных образований установлены два вторичных ореола рассеяния лантана и церия (пространственно они почти полностью совпадают) и вторичный ореол бария, который с ореолами лантана и церия совмещен частично. Эти ореолы, выявленные в пределах участков проявления указанных выше геохимических барьеров, развиваются непосредственно над мощным телом карбонатитов. Из таблицы следует, что наложенные ореолы рассеяния карбонатитового оруденения являются достаточно контрастными, обладают значительной линейной и площадной продуктивностью. Прослеженная длина ореолов достигает 800 м.

Значительные размеры, комплексный характер и контрастность выявленных ореолов позволяют надежно обнаруживать их при литохимической съемке с валовыми определениями элементов-индикаторов в пробах. Из малых значений  $K_d$  (см. таблицу) следует, что надежное обнаружение вторичных ореолов возможно лишь в тех случаях, когда ореолы соответствуют телам карбонатитов с продуктивностью в десятки-сотни метро-процентов лантана, церия и бария.

Показателем солевого характера описываемых ореолов является явное обогащение лантаном и церием самых тонких (менее 0,07 мм) фракций валовых геохимических проб, сложенных существенно глинистыми минералами. Поэтому контрастные и протяженные вторичные ореолы рассеяния выявляются только при использовании фракции литохимических проб менее 0,071 мм.

Вторичные ореолы рассеяния лантана, церия и бария на уровне горизонтов В и ВС почвенно-делювиальных образований

Ореолообразующий элемент	$C_{\Phi}, n \cdot 10^{-3}\%$	$\epsilon$	Параметры вторичных ореолов						
			$C_{\max}, \%$	$M \pm \frac{s}{\sqrt{n}}, M\%$	$2a \pm \frac{s}{\sqrt{n}}, M$	$P, M^2\%$	$K_a$	$\gamma$	$k$
Лантан	3,1	1,34	0,01-0,025	0,3±0,08	35-60	120	3,2-8,1	4,0-7,1	0,003-0,04
Церий	3,1	1,35	0,012	0,2±0,1	35±9,7	86	3,2-3,9	3,9-4,5	0,005-0,04
Барий	50,0	1,34	0,2	2,8±0,8	33±6,8	840	4,0	4,7	0,017

Примечание.  $C_{\Phi}$  - значение местного геохимического фона;  $\epsilon = \text{ant} \lg s_{1g}$ , где  $s_{1g}$  - стандартное отклонение;  $C_{\max}$  - максимальные концентрации элемента в контуре ореола;  $M$  - средняя оценка линейной продуктивности ореола;  $\frac{s}{\sqrt{n}}$  - доверительные пределы показателя;  $2a$  - средняя эффективная ширина ореола;  $P$  - площадная продуктивность ореола;  $K_a = \frac{C_1}{C_{\Phi}}$  - коэффициент аномальности;  $\gamma$  - показатель контрастности;  $k$  - коэффициент остаточной продуктивности ореолов.

В формировании вторичных наложенных ореолов рассеяния большая роль принадлежит, по-видимому, диффузии и миграции поровых вод, а также восходящим потокам глубинных вод, обогащенных лантаном, церием и барием, в зонах докембрийских, постмеловых и четвертичных разрывных нарушений. Редкоземельные элементы, перешедшие в раствор в результате выветривания карбонатов, мигрируют в разной форме. В качестве главной формы переноса редкоземельных элементов в грунтовых и трещинных водах района выступает растворенная форма (ионная и комплексная) [1]. Учитывая состав характеризуемых вод, можно заключить, что миграция лантана и церия в них осуществляется преимущественно в виде комплексных соединений редкоземельных элементов с ионами  $SO_4^{2-}$ ,  $Cl^-$  и в виде сульфатов. По данным химических и спектральных анализов, в гидрокарбонатно-хлоридно-сульфатных водах района месторождения обнаружено  $5 \cdot 10^{-4}$ – $7 \cdot 10^{-4}$  мг/л Zn и 0,02–0,08 мг/л Ba.

В водных вытяжках литохимических проб с площади выявленных вторичных ореолов рассеяния установлено 0,002–0,005 мг/л Zn и 0,01–0,04 мг/л Ba.

Наиболее вероятными формами фиксации элементов в ореолах является сорбция в глинистых минералах, а также образование водно-растворимых сульфатов и хлоридов ореолообразующих элементов.

По-видимому, определенную роль играют и осаждение церия, и отчасти осаждение лантана на кислородном геохимическом барьере: в окислительной обстановке горизонтов В и ВС почв происходит окисление церия с переходом  $Ce^{3+}$  в  $Ce^{4+}$ . При переходе  $Ce^{3+}$  в  $Ce^{4+}$  происходит изменение ионного радиуса, заряда ядра и, как следствие этого, резкое уменьшение растворимости его соединений [1].

Следовательно, вторичные наложенные ореолы рассеяния лантана, церия и бария представляют гипергенные новообразования на сорбционном, кислородном и испарительном геохимических барьерах. Результаты выполненных работ свидетельствуют о принципиальной возможности применения литохимической съемки по вторичным ореолам рассеяния (выполняемой на детальной ландшафтно-геохимической основе) с целью поисков погребенных апатит-редкометалльных карбонатитовых месторождений в подуаридных и аридных ландшафтах.

## ЛИТЕРАТУРА

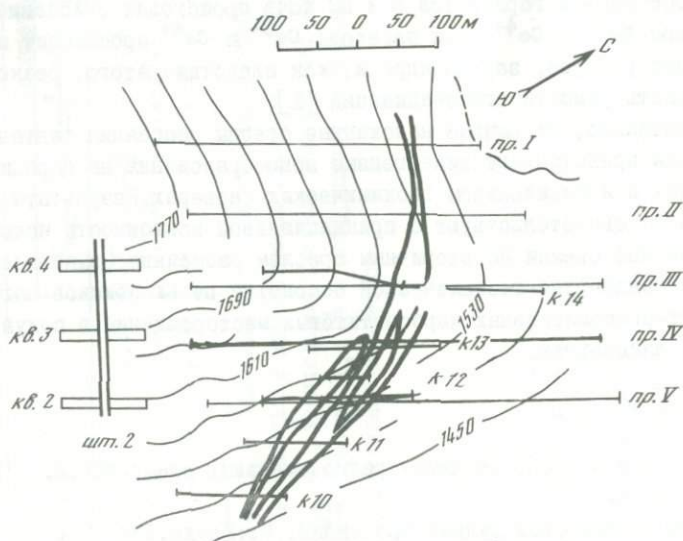
1. Балашов Ю.А. Геохимия редкоземельных элементов. М.: Наука, 1976. 267 с.
2. Геохимия ландшафтов рудных провинций. М.: Наука, 1982. 261 с.
3. Соловов А.П., Матвеев А.А. Геохимические методы поисков рудных месторождений: Учеб. пособие. М.: Изд-во МГУ, 1985. 234 с.

### К ВОПРОСУ ОБ ИНТЕРПРЕТАЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ГЕОХИМИЧЕСКОГО ОПРОБОВАНИЯ КУРУМНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ

Опытно-методическими исследованиями в коренных вмещающих породах и курумных образованиях на восточном фланге месторождения Удокан (р.Наминга) выявлены ореолы меди, серебра, висмута, молибдена и других элементов, четко фиксирующие известные рудные тела медистых песчаников халькозин-борнитового состава [1].

Для того, чтобы установить степень соответствия первичных ореолов в коренном залегании с ореолами, заключенными в курумах, была изучена интенсивность вероятного перераспределения элементов в последних.

В таблице приведены коэффициенты соответствия  $K_c$ , благодаря которым можно определить степень относительной концентрации, или выноса, отдельных элементов-индикаторов в процессе формирования аномалий в курумных отложениях. При расчете коэффициента соответствия средние содержания элементов, рассчитанные по профилям сопряженного опробования: коренных пород (квершлаг штольни № 2), слабыветрелых коренных пород (канавы) и курумных образований (профили на поверхности) (см. рисунок).



Р и с . I. Схема опробования участка Левый борт р.Наминги  
Жирными линиями обозначено рудное тело

Данные таблицы показывают, что в условиях описываемого участка наиболее активно перераспределяется основной рудный элемент — медь, образующая широкие размазанные ореолы в курумах, тогда как для цинка, серебра и свинца подобная тенденция не выражена. Кроме того, контрастность гипергенного разделения элементов, имеющих экстремальные значения  $K_C$ , резко увеличивается при приближении к поверхности (от штольни, через канавы к курумам), достигая максимальных значений в

Взаимоотношения характеристик элементов в аномалиях, выявленных в неизмененных (штольня), слабоизмененных (канавы) коренных породах и в курумных образованиях

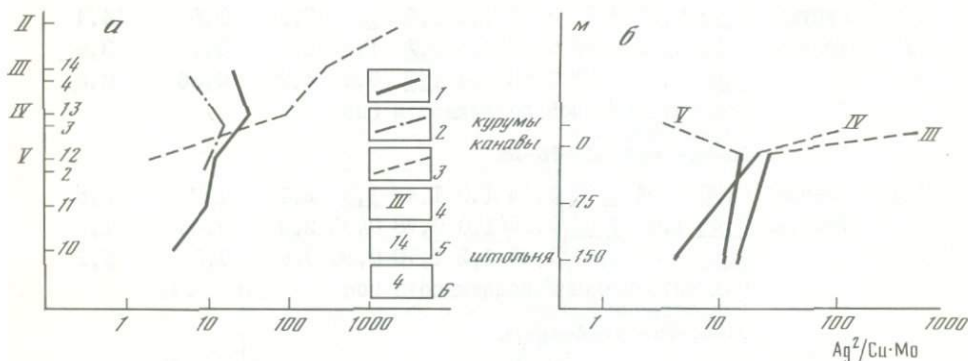
Номер разреза	Уровень опробования	$K_C$ элементов							Контрастность миграции		
		Cu	Co	Ni	Mo	Pb	Zn	Ag	$\frac{\max}{\min}$	$\frac{Cu \cdot Ag \cdot Mo}{Pb \cdot Zn}$	$\frac{Ag^2}{Cu \cdot Mo}$
III	Курумы	<u>0,24</u>	0,6	0,66	0,69	1,5	2,4	<u>2,6</u>	10,8	1,5	42,2
IV	Штольня	<u>0,18</u>	0,7	0,9	0,84	1,5	<u>2,5</u>	1,1	20,8	0,53	8,0
У		<u>0,30</u>	1,0	0,7	0,8	1,8	<u>3,5</u>	0,4	10,1	1,36	0,7
Ряд миграционной подвижности (по возрастанию $K_C$ ) Cu-Co-Ni-Mo-Ag-Pb-Zn											
III	Курумы	<u>0,23</u>	0,57	0,8	0,73	1,5	1,6	<u>1,7</u>	7,3	0,6	14,4
IV	Канавы	<u>0,38</u>	0,72	0,89	0,93	1,5	<u>3,2</u>	1,2	8,4	1,9	3,6
У		<u>0,4</u>	1,0	0,53	0,84	1,4	<u>1,7</u>	0,5	4,2	0,36	0,8
Ряд миграционной подвижности (по возрастанию $K_C$ ) Cu-Ni-Co-Mo-Ag-Pb-Zn											
III	Канавы	0,90	1,04	<u>0,71</u>	0,94	1,0	1,4	<u>1,5</u>	2,1	1,7	2,8
IV	Штольня	<u>0,46</u>	1,0	<u>1,08</u>	0,95	1,0	0,78	0,93	2,3	0,35	1,9
У		<u>0,45</u>	1,0	1,50	1,40	1,2	1,70	0,80	3,8	1,0	1,1
Ряд миграционной подвижности (по возрастанию $K_C$ ) Cu-Co-Pb-Ni-Mo-Ag-Zn											

Примечание. Подчеркнуты экстремальные значения  $K_C$ .

курумных образованиях, где она колеблется от 10 до 20 единиц. Это означает, что абсолютная величина соотношений каждой из рассматриваемых пар элементов в аномалиях, заключенных в курумах дает 10–20-кратное расхождение с аналогичным показателем в первичных ореолах. В то же время вариации мультипликативных произведений основных элементов-индикаторов медного оруденения отличаются существенно меньшим диапазоном: Как следует из таблицы, соответствующие  $K_C$  для мультипликативных ореолов по всем профилям значительно меньше моноэлементных, т.е. мультипликативные аномалии, выявленные в курумных отложениях, по сво-

им параметрам отличаются от аналогичных содержаний в коренных породах максимум в 2 раза. Очевидно, что при перемножении содержаний элементов с различными миграционными характеристиками происходит взаимное гашение искажающего влияния гипергенеза на распределение элементов, что лишней раз подтверждает вывод о том, что для большей надежности геохимического прогноза предпочтительнее использовать мультипликативные ореолы.

Вариации величины мультипликативного коэффициента геохимической зональности  $\frac{Ag^2}{Cu \cdot Mo}$  в системе курумы - поверхность-подземная выработка в данном случае меняются от 0,7 до 42 единиц, что значительно осложняет его использование при оценке аномалий в коренном залегании по их курумным аналогам. Это объясняется тем, что в данный коэффициент включены элементы, отличающиеся по миграционным характеристикам, т.е. занимающие противоположные места в рядах миграционной подвижности. Очевидно, что столь высокая степень деформации данного коэффициента при низкой контрастности вертикальной зональности делает нецелесообразным его использование для оценки уровня эрозионного среза гипогенных аномалий по результатам опробования курумов (рис.2). Подобрать другой информативный коэффициент зональности также невозможно из-за крайне ограниченного круга элементов-индикаторов стратиформного медного оруденения.



Р и с . 2. Изменение индикаторного отношения в меридиональном (а) и вертикальном (б) направлениях

1-3 - графики по коренным породам: 1 - канавы, 2 - кваршлагги штольни, 3 - курумы; 4-6 - номера: 4 - профилей опробования курумов, 5 - канав, 6 - кваршлаггов штольни

Но следует отметить, что на стратиформных пологозалегающих месторождениях в отличие от вертикальной основное значение имеет горизонтальная зональность, для выявления которой, как показали проведенные исследования, данный коэффициент можно с успехом использовать. Как следует из таблицы, значение данного коэффициента возрастает от У профиля к III в соответствии с вектором направления горизонтальной зональности;

очевидно, что там, где в первичных ореолах много серебра (фронтальные части ореолов), в курумных отложениях его еще больше за счет процесса накопления в результате гипергенного воздействия. Там, где меди мало в коренных породах, в курумных образованиях ее еще меньше из-за интенсивного выщелачивания, т.е. процессы гипергенной деформации ореолов способствуют усилению горизонтальной зональности.

Приведенные данные свидетельствуют о возможности использования геохимических аномалий в курумах в качестве поисковых признаков коренного медного оруденения, а также позволяют рассчитывать на возможность использования результатов геохимического опробования курумов не только для обнаружения рудоносных зон, но и для определения вероятного местонахождения конкретных рудных залежей с помощью высококонтрастной горизонтальной геохимической зональности.

## Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Рудогенные геохимические аномалии. М.: Недра, 1982. 208 с.

УДК 550.842:681.3

Ю.В.Шваров

### ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ЛИТОХИМИЧЕСКИХ ПОТОКОВ РАССЕЯНИЯ ПРИ РАЗЛИЧАЮЩИХСЯ СКОРОСТЯХ МИГРАЦИИ РУДНЫХ КОМПОНЕНТОВ

Содержания многих рудных элементов в потоках рассеяния вторичных остаточных ореолов, расположенных на склонах русел первого порядка, хорошо удовлетворяют соотношению  $C'S = \text{const}$ , где  $C'$  — содержание элемента в аллювии (за вычетом фона),  $S$  — площадь водосбора соответствующей точки русла, расположенной ниже ореола (по течению). В этом случае величина  $P' = C'S$ , называемая продуктивностью потока рассеяния, как было показано А.П.Солововым [1], пропорциональна площадной продуктивности вторичного ореола на склоне:  $P' = k''P$ , где  $k''$  — коэффициент пропорциональности, определяемый из опыта. Это позволяет достаточно надежно интерпретировать подобные потоки рассеяния, называемые идеальными.

Однако уже в руслах 2-го порядка эти простейшие зависимости начинают нарушаться, а к руслам 3-го и более высоких порядков они заведомо неприменимы. Эти потоки рассеяния, названные реальными в отличие от рассмотренных выше идеальных потоков, характерны тем, что их продуктивность  $P'$  не остается постоянной после прекращения поступления со склонов рудного материала, а закономерно убывает вдоль русла. Необходимость интерпретации неидеальных потоков рассеяния привела к разработке нового метода оценки продуктивности ореола, основанного на введении дополнительного параметра  $\alpha'$  — склонового коэффициента аллювия. Значение этого параметра, отражающего суммарный эффект действия всех факторов, приводящих к неидеальности потока рассеяния, может

быть определено непосредственно по наблюдаемым содержаниям рудного элемента в потоке рассеяния. Метод определения величины  $\alpha'$  подробно описан в [2], где этому параметру придается смысл кратности участия в аллювии материала ближайших склонов по сравнению с его ожидаемой долей в случае идеального потока рассеяния. Другой метод оценки этого параметра реализован в программе "Поток", в которой вычисляется значение коэффициента выноса  $\beta'$  ( $\beta' = 1/\alpha'$ ), интерпретируемого как доля осаждающегося материала по сравнению со всем материалом, поступающим в русло со склонов [3].

Методика интерпретации реальных потоков рассеяния получила широкое распространение и позволяет во многих случаях оценивать ореолы на склонах достаточно точно, но ограничения все же существуют. Так, рудные элементы, представленные тяжелыми и инертными минералами (например, самородное золото), образуют потоки рассеяния, часто не поддающиеся интерпретации, поскольку в этом случае величина  $\beta'$  близка к нулю. Кроме того, коэффициент пропорциональности  $k'$  между продуктивностью потока рассеяния и продуктивностью вторичного ореола определяется для идеальных потоков рассеяния как их отношение и применяется к реальным потокам рассеяния по аналогии, без какого-либо обоснования. Наконец, при разработке упомянутых методов не учитывается тот факт, что различные компоненты (минералы) поступающего в русло вещества мигрируют в потоке с различными скоростями; вопрос о погрешности вносимой этим упрощением, не исследовался, хотя во многих случаях (например, для тяжелых самородных металлов) разница скоростей миграции рудного вещества и вмещающей породы играет определяющую роль в формировании аномалий в потоке и, в частности россыпей.

В настоящей статье выведено уравнение реального потока рассеяния, учитывающее различие скоростей миграции рудных компонентов и вмещающей породы. Для большей наглядности сначала рассмотрен случай, когда рудный компонент мигрирует в водном потоке с той же скоростью, что и вмещающая породы. Хотя полученное при этом уравнение совпадает с предложенным ранее, приведенный вывод позволяет установить геохимический смысл коэффициентов  $\alpha'$  и  $\beta'$ . При рассмотрении общего случая различных скоростей миграции показано, что пренебрежение этим различием может в некоторых случаях привести к серьезным погрешностям при оценках геохимических аномалий. Кроме того, коэффициент  $k'$  интерпретирован как отношение скоростей миграции, а также показано, что формула  $P' = k'R$  не имеет места в случае неидеального потока рассеяния.

Математическая модель потока рассеяния. Основным допущением при построении математической модели потока рассеяния является предположение о стационарности содержаний химических элементов в рыхлых отложениях; т.е. содержания элементов изменяются вдоль русла, но не зависят от времени:  $C=C(x)$ . Предполагается также, что в установившемся потоке рассеяния имеет место режим идеального перемешивания. В данном

случае это означает, что для каждого сечения русла во всех точках этого сечения содержания химических элементов одинаковы как для осадков, так и для взвешенных частиц и другого транспортируемого материала.

Используемые обозначения (для упрощения записи все штрихи, относящиеся к величинам в потоке, опущены):

$x$  - расстояние вдоль русла от его начала, м;

$C(x)$  - содержание (объемная доля) некоторого химического элемента в твердом стоке в точке  $x$  русла;

$S(x)$  - площадь водосбора для точки  $x$  русла,  $m^2$ ;

$l(x)$  - линия горного склона от водоразделов до точки  $x$  русла; то же обозначение используется для указания длины этой линии, м;

$\bar{C}(x)$  - среднее содержание химического элемента (объемная доля) в поверхностном слое породы вдоль русла ( $x$ );

$v$  - скорость эрозии: толщина слоя породы, разрушаемого и сносимого в русло за единицу времени, м/с;

$u$  - средняя скорость твердого вещества в потоке, м/с;

$\delta(x, t)$  - площадь сечения водного потока, занятая транспортируемым твердым материалом,  $m^2$ ;

$P(x)$  - площадная продуктивность вторичного ореола рассеяния рудного элемента на площади  $S(x)$ ,  $m^2 \cdot об. доля$ .

Другие обозначения будут вводиться по мере необходимости. Все функции независимой переменной  $x$  могут рассматриваться и как функции переменной  $S$ , так как  $S$  - строго возрастающая функция  $x$ . Поэтому в дальнейшем возможны обозначения  $C(S)$ ,  $P(S)$  и т.д. Между функциями  $P$  и  $C$  имеется непосредственная связь:

$$P(x) = \int_0^x \bar{C}(\xi) l(\xi) d\xi = \int_0^S \bar{C}(S) dS, \text{ так как } l(x) = \frac{dS(x)}{dx} \text{ и } \bar{C}(x) = \bar{C}(S) = \frac{dP(S)}{dS}.$$

Пусть при равномерной эрозии со скоростью  $v$  в потоке рассеяния установилось стационарное распределение  $C(x)$  содержаний некоторого элемента. Заметим, что не делается никаких предположений о характере изменения во времени и вдоль русла мощности осадка или количества транспортируемого материала. Пусть в момент времени  $t$  распределение материала, переносимого водным потоком, описывается функцией  $\sigma(x, t)$ . Рассмотрим участок русла от точки  $x$  до точки  $x + \Delta x$ . В этот участок за время  $\Delta t$  поступают со склонов следующие количества твердого материала:

$$q_0 = v \Delta t \int_x^{x+\Delta x} l(\xi) \bar{C}(\xi) d\xi \quad \text{и} \quad Q_0 = v \Delta t \int_x^{x+\Delta x} l(\xi) d\xi,$$

где  $q_0$  - объем рудного компонента, а  $Q_0$  - общий объем породы. За то же время в рассматриваемый участок русла вместе с водным потоком поступают следующие объемы рудного компонента и породы:

$$q_+ = C(x) u \int_t^{t+\Delta t} \delta(x, \tau) d\tau \quad \text{и} \quad Q_+ = u \int_t^{t+\Delta t} \delta(x, \tau) d\tau.$$

Аналогично выносимые потоком объемы рудного компонента и породы равны соответственно

$$q_- = C(x+\Delta x)u \int_t^{t+\Delta t} \sigma(x+\Delta x, \tau) d\tau \quad \text{и} \quad Q_- = u \int_t^{t+\Delta t} \sigma(x+\Delta x, \tau) d\tau.$$

Изменения объема рудного вещества и всей породы в целом в данном интервале русла за время  $\Delta t$  равны соответственно

$$\Delta Q = q_c + q_+ - q_- \quad \text{и} \quad \Delta Q = Q_c + Q_+ - Q_-.$$

Так как, согласно предположению, происходит полное перемешивание материала, а содержания в каждой точке русла постоянны во времени, то  $\Delta Q / \Delta Q = C(x + \epsilon \Delta x)$ , где  $0 \leq \epsilon \leq 1$ . Переходя в этом выражении к пределу при  $\Delta x \rightarrow 0$  и  $\Delta t \rightarrow 0$ , получим

$$\frac{u}{v} \sigma(s, t) \frac{dC(s)}{ds} = \bar{C}(s) - C(s).$$

Анализ полученного уравнения показывает, что в общем случае, когда  $u \neq 0$  и  $C(s) \neq \text{const}$ , функция  $\sigma(s, t)$  не зависит от  $t$ . Это означает, что стационарность процесса в отношении содержаний влечет за собой и стационарность в отношении количеств транспортируемого материала. Таким образом, уравнение стационарного потока рассеяния может быть записано следующим образом:

$$\frac{u}{v} \sigma(s) \frac{dC(s)}{ds} = \bar{C}(s) - C(s). \quad (I)$$

Рассмотрим три частных случая.

1. Твердый материал не транспортируется потоком ( $u = 0$ ). В этом случае уравнение (I) приобретает вид  $\bar{C}(s) = C(s)$  т.е. концентрации в потоке равны соответствующим средним концентрациям на склонах. При этом функция  $\sigma(s, t)$  не определена.

2. Потоком полностью выносятся весь материал, попадающий в русло со склонов. В этом случае выражение для  $\sigma(s)$  можно получить из следующих соображений. За время  $\Delta t$  в русло выше точки  $x$  поступает объем породы  $S(x) v \Delta t$ ; за то же время через сечение  $x$  русла переносится объем  $u \sigma(x) \Delta t$ . Так как, по предположению, поток выносит весь материал, то  $S(x) v \Delta t = u \sigma(x) \Delta t$ , или  $\sigma(x) = v/u S(x)$ . Подставляя полученное выражение для  $\sigma(x)$  в (I), получим

$$\bar{C}(s) = \frac{dP(s)}{ds} = s \frac{dC(s)}{ds} + C(s) = \frac{d(Cs)}{ds},$$

что после интегрирования (в пределах от 0 до  $x$ ) дает известную формулу А.П.Соловова  $P = Cs$  для идеальных потоков рассеяния.

3. Со склонов поступает больше материала, чем может транспортировать поток. При этом объем переносимого потоком материала пропорционален количеству воды в русле, которое, в свою очередь, пропорционально площади водосбора:  $\sigma(s) = \omega S$  (коэффициент пропорциональности  $\omega$  определяется местными условиями: рельефом, климатом и т.д.). Тогда уравнение (I) примет вид

$$\frac{u}{v} \omega \cdot S \frac{dC}{ds} = \bar{C} - C.$$

Это уравнение совпадает с уравнениями, предложенными ранее, если произведение  $\frac{u}{v} \omega$  обозначить через  $\beta'$  (коэффициент выноса), или, что то же самое,  $\frac{u}{v} \omega^{-1}$  через  $\alpha'$  (склоновый коэффициент аллювия). Из условия  $\alpha' \geq 1$  следует, что для реальных потоков рассеяния должно выполняться условие  $\omega \leq v/u$ . Очевидно, что при  $\omega < v/u$  происходит осадконакопление; случай  $\omega = v/u$  соответствует идеальному потоку рассеяния; при  $\omega > v/u$  происходит размыв русловых отложений.

Так как гидрологические условия реальных водных потоков непостоянны, величина параметра  $\omega$  изменяется во времени, а вместе с ней меняется и режим формирования потока рассеяния. Этим соображением можно объяснить, почему в действительности русла водотоков не засыпаются обломочным материалом, однако мы вынуждены принять допущение о стационарности литохимических потоков рассеяния, для того чтобы сделать задачу их интерпретации определенной.

Поток рассеяния с неравными скоростями миграции. В рассмотренной модели предполагалось, что все минералы как рудные, так и породообразующие, мигрируют в водном потоке с одинаковой скоростью  $u$ . В некоторых случаях модель, построенная на этом предположении, позволяет интерпретировать потоки рассеяния с удовлетворительной точностью, однако часто, как уже указывалось, различие в скоростях миграции рудных и нерудных минералов столь значительно, что его учет становится необходимым. В качестве первого приближения будем считать, что скорости миграции породообразующих минералов равны между собой, и обозначим эту скорость через  $u_r$ , а для скорости миграции рудного компонента примем обозначение  $u_o$  (в общем случае  $u_o \neq u_r$ ). В то же время скорости эрозии для всех минералов будем считать одинаковыми и равными  $v$ , т.е. примем, что  $v_o = v_r = v$ . Для того чтобы учесть различие скоростей миграции в математической модели потока рассеяния, необходимо в балансовых уравнениях для  $\Delta Q$  и  $\Delta C$  заменить величину  $u$  на  $u_o$  и  $u_r$  соответственно. В результате преобразований, полностью аналогичных приведенным выше, уравнение потока рассеяния приобретает следующий вид:

$$\frac{u_o}{v} \sigma(s) \frac{dC(s)}{ds} + \frac{u_o - u_r}{v} C(s) \frac{d\sigma(s)}{ds} = \bar{C}(s) - C(s). \quad (2)$$

Полученное уравнение позволяет, в частности, выявить геохимический смысл эмпирического коэффициента  $k'$ , а также уточнить его роль в оценке продуктивности вторичных ореолов по неидеальным потокам рассеяния.

Исследуем уравнение (2) для последних двух из рассмотренных выше частных случаев.

I. Полный вынос породы, при этом  $\sigma(s) = v/u_r$ . Подстановка этого выражения в (2) и последующие упрощения приводят к уравнению  $u_o/u_r \frac{d(CS)}{ds} = CS$ , которое после интегрирования дает  $P = \frac{u_o}{u_r} CS$ , что совпадает с формулой  $P = kP$  для идеальных потоков рассеяния, если при-

нять  $k' = u_x/u_0$ . Таким образом, значение  $1/k'$  в уравнении А.П.Соловова имеет смысл относительной скорости миграции рудного компонента по сравнению с вмещающей породой.

2. Водный поток транспортирует максимально возможное количество породы. В этом случае, как уже было показано,  $\sigma(S) = \omega S$ . Подстановка в (2) дает уравнение  $\bar{C} = \omega/v [u_0 S dC/dS + (u_0 - u_x + v/\omega)C]$ , интеграл от которого дает продуктивность ореола на склоне:  $P = u_0/v \omega CS + (1 - u_x/v\omega) \int C dS$ .

Для удобства дальнейшего обсуждения и в соответствии с изложенным выше введем следующие обозначения. Положим  $\beta = \omega u_x/v$  и  $\alpha = u_0/u_x$ . Величину  $\beta$  как и раньше, будем называть коэффициентом выноса. Нужно отметить, что для идеального потока рассеяния параметр  $\alpha$  — это величина, обратная коэффициенту  $k'$  если же поток рассеяния неидеален, то значение  $\alpha$ , как будет видно из дальнейшего, не равно отношению продуктивностей потока и ореола.

Используя введенные параметры, можно в наиболее компактной и наглядной форме записать выражения для продуктивности аномалии на склоне (P) через содержания рудного элемента в аллювии (C):

$$P = \alpha \cdot c \cdot S \text{ (идеальный поток рассеяния),} \quad (3)$$

$$P = \alpha \cdot c \cdot S \cdot \beta + (1 - \beta) \int C dS \text{ (реальный поток рассеяния).} \quad (4)$$

Формула (4) дает наиболее общее выражение для продуктивности ореола, включающее в себя все распространенные описанные соотношения.

При  $\alpha = 1$  из (4) получается формула для неидеального потока рассеяния из [2,3] (в этих работах параметр  $k'$  вводится после оценки продуктивности потока P); подстановка  $\beta = 1$  дает формулу для идеального потока рассеяния [1] (с учетом  $k'$ ).

В любом случае значение параметра  $\alpha$  нельзя определить по содержаниям рудного элемента в потоке рассеяния. Оно должно быть либо задано исходя из свойств минералов, слагающих руду и породу, из соотношения  $\alpha = u_0/u_x$ , либо определено эмпирически в соответствии с формулой (3) как отношение продуктивностей ореола и соответствующего ему идеального потока рассеяния  $\alpha = P/P'$ . Следует обратить внимание на то, что в отличие от коэффициента выноса  $\beta$ , определяемого только свойствами водного потока и вмещающей породы и имеющего вследствие этого одно и то же значение для всех компонентов изучаемой аномалии, значения параметра  $\alpha$  индивидуальны для каждого рудного элемента.

Рассмотренная математическая модель показывает, что на результат интерпретации потоков рассеяния существенное влияние оказывает значение параметра  $\alpha$  (относительная скорость миграции рудного компонента). В частности, при  $\alpha \approx 0$  (например, для самородного золота) и полном выносе вмещающей породы ( $\beta = 1$ ) интерпретация потока рассеяния становится невозможной — в этом случае происходит непрерывное обогащение осадка и образуется россыпь, т.е. такой поток является природной драгой.

2. При выводе дифференциальных уравнений потока рассеяния использованы объемные концентрации, поэтому при пересчете реальных данных, выраженных в весовых процентах, необходимо вводить в формулы соответствующие переходные коэффициенты. Если же принять, что плотности всех минералов на склонах и в потоке приблизительно одинаковы, то можно обойтись и без указанных поправок.

3. Интерпретация потоков рассеяния на основе описанной модели возможна в том случае, если главные породообразующие минералы обладают близкими миграционными свойствами или вмещающая порода практически мономинеральна. Также требуется, чтобы содержания рудного компонента были достаточно малы как на склоне, так и в потоке рассеяния. Если указанные условия не имеют места, то для интерпретации таких потоков необходима разработка соответствующей математической модели.

4. Возможна следующая словесная формулировка формулы (4): продуктивность вторичного ореола рассеяния есть среднее взвешенное динамической (кажущейся продуктивности потока  $\alpha CS$ ) и статической (интеграла  $\int C dS$ ) продуктивностей с весовым коэффициентом  $\beta$ . Отсюда становится ясным, что коэффициент  $k'$  равен отношению продуктивностей ореола и потока рассеяния только в случае идеальных потоков, так как он входит лишь в динамическую составляющую продуктивности.

5. Практическая интерпретация потоков рассеяния на основе предложенной модели не представляет трудностей, если известно значение параметра  $\alpha$  (это не является серьезным ограничением, так как знание этого параметра необходимо и для применения прежних методик) – адаптация программы "Поток" требует для этого минимальной модификации. В методику "ручной" оценки аномалий, описанной в [2], должны быть внесены следующие изменения:

а) склоновый коэффициент аллювия  $\alpha'$ , оцениваемый обычным образом, должен быть пересчитан в новое значение параметра  $\alpha^{\#}$  по формуле  $\alpha^{\#} = \alpha(\alpha' - 1) + 1$ ;

б) вычисление параметра  $\lambda'$  следует производить в этом случае таким образом:

$$\lambda' = (\alpha/\alpha^{\#} - 1/\alpha^{\#} + 1) \frac{1 - (S_{R_0}/S_R)}{1 - [(S_{R_0}/S_R)(\alpha^{\#} - 1)/\alpha + 1]}$$

Поскольку  $\lambda'$  зависит от трех параметров ( $\alpha^{\#}$ ,  $\alpha$ ,  $S_{R_0}/S_R$ ), одной номограммы уже недостаточно. Таким образом, "ручная" оценка аномалий заметно усложняется.

6. Поскольку параметр  $\beta$  описывает миграцию вмещающей породы, а каждый рудный элемент характеризуется специфическим параметром  $\alpha$ , имеется возможность комплексной интерпретации аномалий в потоке рассеяния, т.е. определения параметра  $\beta$  одновременно по нескольким рудным элементам (предпочтительно по тем, которые имеют длинные "шлейфы" в потоке). Это, с одной стороны, позволит повысить надежность опреде-

ления коэффициента выноса, а с другой – оценивать аномалии по тем компонентам, для которых  $\alpha \approx 0$ . Например, приняв для самородного золота  $\alpha_{Au} = 0$ , получим  $R_{Au} = (1-\beta) \int C ds$ , где коэффициент выноса  $\beta$  определяется по мышьяку обычным образом, если известно значение  $\alpha_{As}$ .

## ЛИТЕРАТУРА

1. Соловов А.П., Кунин Н.Я. Металлометрическая съемка по потокам рассеяния. // Сов. геология, 1960. № 5. С. 32–46.
2. Соловов А.П., Шваров Ю.В. Оценка оруденения по литохимическим потокам рассеяния. // Разведка и охрана недр. 1980. № 1. С. 25–30.
3. Шваров Ю.В. Интерпретация на ЭВМ литохимических потоков рассеяния. // Вестн. МГУ. Сер. 4, Геология. 1984. № 2. С. 58–63.

УДК 550.84:681.3

А.Г.Марченко

### МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ЛИТОХИМИЧЕСКИХ ПОТОКОВ РАССЕЯНИЯ КАК ОСНОВА ИХ КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИИ

Способ количественной интерпретации литохимических потоков рассеяния, рекомендуемый Инструкцией по геохимическим методам поисков... [3], основан на предложенной А.П.Солововым [6] модели первого приближения, которая предполагает, что состав аллювия в любой точке потока отражает средний состав рыхлых образований всего бассейна денудации. Эта модель подразумевает стационарность процесса потокообразования и применима к активно денудированным районам, где можно пренебречь растворимым стоком по сравнению с переносом материала в твердой фазе. Согласно модели А.П.Соловова, продуктивность потока рассеяния на интервале поступления рудного вещества возрастает до максимального значения и далее, ниже по течению, сохраняет постоянное значение. Аналогичная модель для расчетов литохимических потоков рассеяния в последние годы используется и зарубежными геохимиками.

Практика геохимических поисков показала ограниченную применимость этой модели – чаще наблюдается убывание продуктивности потока рассеяния по мере удаления от рудного интервала. Отклонения реальных потоков рассеяния от модели первого приближения объясняются тем, что в составе аллювия преобладает материал ближайших склонов. По мнению А.Н.Боголюбова [1], динамические характеристики потока на его протяжении могут неоднократно изменяться. На отдельных отрезках потока преобладает либо седиментационный (собранный со всей площади бассейна), либо денудационный (снесенный с ближайших склонов) материал. В первом случае пригодна модель А.П.Соловова; во втором – для расчетов требуется априорное определение характеристик ближайших склонов, что затрудняет решение обратной задачи – количественной оценки ору-

денения по выявляемым в аллювии потокам рассеяния. В.В.Поликарпочкин [4,5]. на основе решения дифференциальных уравнений переноса твердого вещества в условиях взаимодействия процессов эрозии и отложения донных осадков создал математические модели литохимических потоков рассеяния в бассейнах прямоугольной и овальной форм. Эти модели объясняют часто наблюдаемые закономерности: завышение продуктивности потока по сравнению с продуктивностью склонового ореола на интервале поступления рудного вещества и постепенное уменьшение продуктивности потока рассеяния ниже рудного интервала. Предложенные В.В.Поликарпочкиным зависимости редко применяются в практических расчетах из-за трудностей, связанных с решением трансцендентных уравнений. К сходному характеру изменения содержаний и продуктивностей потоков рассеяния приводит модель второго приближения, созданная А.П.Солововым и Ю.В.Шваровым [8] для бассейнов произвольной формы. Модель Соловова-Шварова доведена до практически удобного способа решения обратной задачи как вручную [7,8], так и на ЭВМ [9]. Эта модель предполагает равенство динамических характеристик рудного и породного материалов в механическом потоке, чем не исчерпывается перечень реальных природных ситуаций. Следует отметить, что существование конкурирующих моделей ставит вопрос об их сравнительном анализе и разработке более общей теории формирования потоков рассеяния. Ниже нами рассматривается новый вариант обобщенной модели литохимических потоков рассеяния в активно денудлируемых районах.

Как и во всех перечисленных моделях, будем считать процесс формирования потока рассеяния стационарным, а миграцию вещества – преимущественно механической. Количество породного материала, поступившего с ближайших склонов в произвольную точку потока  $x_0$  за единицу времени, равно

$$q'_{\text{пор}}(x_0) = \rho \Delta h dS_0, \quad (1)$$

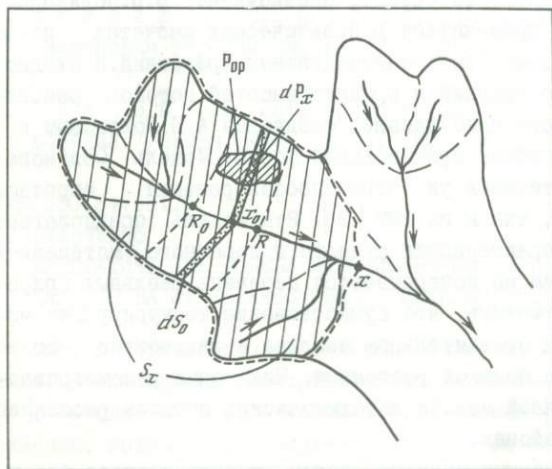
где  $\rho$  – объемная масса денудлируемых склоновых отложений;  $\Delta h$  – толщина слоя денудации за единицу времени;  $dS_0$  – элементарная площадь денудации, опирающаяся на точку  $x_0$  (рис.1). Материал, поступивший в водоток в точке  $x_0$ , по ходу движения в потоке постепенно выводится из опробуемых аллювиальных отложений – проседает в ложе водотока, скрываясь захороненным и, растворяясь, переходит в водную фазу. В общем случае, в составе опробуемого аллювия любой точки  $x_0$ , расположенной ниже точки  $x$  по течению ( $x < x_0$ ), содержится только часть материала, поступившего со склонов в водоток  $x_0$ , т.е.  $q'_{\text{пор}}(x_0 \rightarrow x) < q'_{\text{пор}}(x_0)$ .

Представляется разумным допустить, что это уменьшение количества материала является функцией соотношения площадей денудации  $S_x$  и  $S_0$ , опирающихся на точки  $x$  и  $x_0$  соответственно. Тогда

$$q'_{\text{пор}}(x_0 \rightarrow x) = q'_{\text{пор}}(x_0) \omega_{\text{пор}}(S_x, S_0), \quad (2)$$

где  $\omega_{\text{пор}}(S_x, S_0)$  - соответствующая весовая функция, учитывающая соотношение породного материала ближних и удаленных склонов в составе аллювия. Учитывая, что через точку  $x$  проходит материал, поступивший в поток на всем интервале  $0 \leq x_0 \leq x$ , получим оценку количества породного материала, проходящего в твердой фазе через точку потока  $x$  за единицу времени:

$$Q'_{\text{пор}}(x) = \int_0^x \rho \Delta h \omega_{\text{пор}}(S_x, S_0) dS_0 \quad (3)$$



Р и с . I. К моделированию литохимического потока рассеяния в активно денудирваемом районе

Аналогично выводится формула количества рудного материала, поступающего в поток на интервале  $R-R_0$ :

$$Q'_P(x) = \int_{S_{R_0}}^{S^*} k' \rho \Delta h \frac{dP}{dS_0} x \omega(S_x, S_0) dS_0, \quad (4)$$

где  $S^* = \begin{cases} S_x, & \text{если } R_0 \leq x \leq R, \\ S_R, & \text{если } x \geq R; \end{cases}$

$P_x$  - площадная продуктивность склоновых ореолов рассеяния в пределах площади  $S_x$ ;  $k'$  - коэффициент соответствия продуктивностей склоновых ореолов и потоков рассеяния. Допуская постоянство  $k'$ ,  $\rho$  и  $\Delta h$  в пределах бассейна денудации, соответствующего данному потоку рассеяния, и равномерность перемешивания рудного и породного материала в аллювии, а также опуская индекс при переменной интегрирования, из формул (3) и (4) получим выражение для  $C_x$  - содержания рудного элемента в точке литохимического потока рассеяния (здесь и далее за вычетом фоновых содержаний в аллювии):

$$C'_x = \frac{k' \int_{S_{R_0}}^{S^*} \frac{dP}{dS_0} x \omega_P(S_x, S) dS}{\int_0^x \omega_{\text{пор}}(S_x, S) dS} \quad (5)$$

В зависимости от характера изменения на интервале поступления рудного вещества и от вида весовых функций  $\omega_P(S_x, S)$  и  $(S_x, S)$  из формулы (5) получаются различные модели потоков рассеяния, соответствующие разнообразным природным условиям. В частном случае, когда весовые функции тождественно равны единице, имеем модель первого приближения.

Исходя из опыта геохимических поисков, можно считать, что значения весовых функций для материала ближайших склонов приближаются к единице, а для бесконечно удаленных склонов в пределе стремятся к нулю. Этому условию отвечают экспоненциальные функции

$$\begin{aligned} \omega_P &= e^{-a(S_x - S)}, \\ \omega_{пор} &= e^{-b(S_x - S)}, \end{aligned} \quad (6)$$

где  $a$  и  $b$  — соответственно динамические параметры рудного и породного материала в потоке. Заметим, что формулы (6) могут быть строго выведены математически, если допустить, что относительная потеря транспортируемого потоком материала на любом его элементарном отрезке пропорциональна увеличению площади бассейна денудации. Из (5) и (6) получаем формулу, описывающую модель литохимического потока рассеяния с экспоненциальными весовыми функциями:

$$C'_x = \frac{k' \int_0^{S_x} \frac{dP_x}{dS} e^{-a(S_x - S)} dS}{\int_0^{S_x} e^{-b(S_x - S)} dS}. \quad (7)$$

В частном случае  $a=b=0$  формула (7) описывает модель первого приближения.

При равномерном поступлении рудного материала в поток рассеяния

$$\frac{dP_x}{dS} = \frac{P_{оп}}{S_R - S_{R_0}} = \text{const}, \quad (8)$$

где  $P_{оп}$  — суммарная продуктивность склонового ореола. В общем случае  $a > 0, b > 0$  на интервале опробования  $x < R_0$   $C'_x = 0$ ; на интервале  $R_0 \leq x \leq R$

$$C'_x = \frac{k' P_{оп}}{S_R - S_{R_0}} \frac{b}{a} \frac{1 - e^{-a(S_x - S_{R_0})}}{1 - e^{-bS_x}}, \quad (9)$$

на интервале  $x > R$

$$C'_x = \frac{k' P_{оп}}{S_R - S_{R_0}} \frac{b}{a} \frac{(e^{aS_x} - e^{aS_{R_0}})}{1 - e^{-bS_x}} e^{-aS_x}. \quad (10)$$

Соответствующие формулы продуктивностей потока рассеяния  $P'_x$  получаются умножением  $C'_x$  на  $S_x$ . Проанализируем характер изменения вдоль русла при нескольких возможных соотношениях динамических параметров  $a$  и  $b$ .

I. В случае, когда из потока рассеяния выводится только рудный материал,  $a > b = 0$ . Переходя в формулах (9) и (10) к пределу при  $b \rightarrow 0$ , получим при  $R_0 \leq x \leq R$

$$P'_x = \frac{k' P_{op}}{a(S_R - S_{R_0})} \left[ 1 - e^{-a(S_x - S_{R_0})} \right], \quad (II)$$

при  $x \gg R$

$$P'_x = k' P_{op} \frac{e^{aS_R} - e^{aS_{R_0}}}{a(S_R - S_{R_0})} e^{-aS_x}. \quad (I2)$$

Максимум продуктивности потока достигается в точке R при соответствующей площади денудации  $S_R$  (см. рис. 2), причем  $P_{max} P_R \geq k' P_{op}$ . Параметр  $a$  легко определяется по графику экспоненциальной зависимости  $P'_x = f(S_x)$ . Для количественной интерпретации можно использовать формулы

$$P_{op} = \frac{\lambda' a}{k'} P'_R \quad (\lambda'_a > 1), \quad \text{где} \quad (I3)$$

$$a(S_R - S_{R_0}) \quad (I4)$$

$$\lambda'_a = \frac{a(S_R - S_{R_0})}{1 - e^{-a(S_R - S_{R_0})}}.$$

2. При равенстве динамических параметров рудного и породного материала в потоке,  $a = b > 0$ , при  $R_0 \leq x \leq R$

$$P'_x = \frac{k' P_{op}}{S_R - S_{R_0}} \frac{1 - e^{-a(S_x - S_{R_0})}}{1 - e^{-aS_x}} S_x, \quad (I5)$$

при  $x \gg R$

$$P'_x = \frac{k' P_{op}}{S_R - S_{R_0}} \frac{e^{aS_R} - e^{aS_{R_0}}}{e^{aS_x} - 1} S_x. \quad (I6)$$

В частном случае бассейнов постоянной ширины из (I5) и (I6) могут быть выведены формулы соответствующих моделей Поликарпочкина. Исследуя  $P'_x$ , нетрудно показать, что  $P'_{max} = P_R > k' P_{op}$  (рис. 2.). Обозначив  $\gamma = aS_R$  из формул (I5) или (I6) при  $S_x = S_R$  получим

$$P_{op} = \frac{\lambda'_\gamma}{k'} P'_R \quad (\lambda'_\gamma < 1), \quad (I7)$$

где

$$\lambda'_\gamma = \left( 1 - \frac{S_{R_0}}{S_R} \right) \frac{1 - e^{-\gamma}}{1 - e^{-\gamma(1 - S_{R_0}/S_R)}}, \quad (I8)$$

причем при  $S_{R_0}/S_R \rightarrow 1$   $\lambda'_\gamma (1 - e^{-\gamma})/\gamma$ . Эти зависимости можно использовать для количественной интерпретации потока рассеяния. Значение  $\gamma$  определяется с помощью палетки по зависимости  $P'_x/P'_R = f(S_x/S_R)$ , график которой строится по результатам опробования реального потока

на интервале  $x \geq R$ . Теоретические кривые (рис.3 а, б) рассчитаны по формуле

$$\frac{P'_x}{P'_R} = \frac{e^{\gamma} - 1}{e^{\gamma}(S_x/S_R) - 1} \frac{S_x}{S_R}, \quad (19)$$

которая выводится из (16) с учетом обозначений  $\gamma$ . Вместо вычислений по формуле (18) можно воспользоваться номограммой (рис.3,в), сходной с номограммой для расчетов по модели Соловова-Шварова [8].

3. Когда существенную роль приобретает миграция рудных элементов в растворенном виде, литохимические аномалии в донных осадках водотоков формируются за счет не только механического перемещения рудных обломков, но и сорбции и осаждения рудных элементов, мигрирующих в растворе. Поэтому по мере удаления от точки поступления рудного вещества в водоток количество рудного вещества  $q'_p(x)$  убывает не так быстро, как  $q_{\text{пор}}(x)$ . Этот пример можно описать уравнениями (9) и (10) при соотношении динамических параметров  $b > a > 0$ . В предельном случае  $b > a = 0$  получаем на интервале  $R_0 \leq x \leq R$

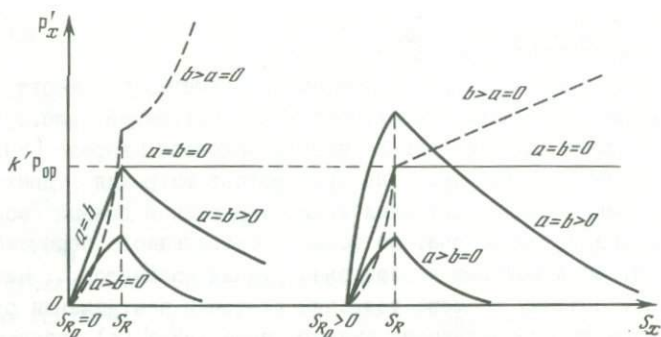
$$P'_x = \frac{k' b P_{\text{оп}}}{S_R - S_{R_0}} \frac{S_x - S_{R_0}}{1 - e^{-b S_x}} S_x, \quad (20)$$

на интервале  $x \geq R$

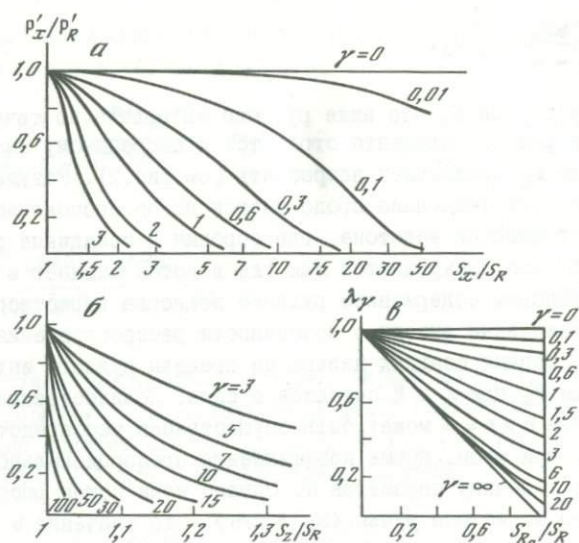
$$P'_x = \frac{k' b P_{\text{оп}}}{1 - e^{-b S_x}} S_x. \quad (21)$$

Нетрудно установить, что ниже рудного интервала по течению водотока содержания рудного элемента стремятся к постоянному значению, а продуктивность  $P'_x$  продолжает возрастать (см.рис.2). Разумеется, в реальных потоках эта тенденция продолжается не до бесконечности, а до выхода на тот участок водотока, где сорбция и осаждение рудного вещества из раствора прекращаются или где водоток впадает в более крупный водоем с фоновым содержанием рудного вещества в растворе. Тем не менее принципиальные выводы о возможности распространения контрастной аномалии в донных осадках далеко за пределы рудного интервала и о возрастании  $P'_x$  при  $x \geq R$  остаются в силе. Количественная интерпретация в случае  $b > a = 0$  может быть осуществлена непосредственно по формуле (21); при этом, кроме коэффициента пропорциональности  $k'$ , требуется знать величину параметра  $b$ . Однако если поток рассеяния начинается далеко от истока ручья ( $S_{R_0} > 2/b$ ), то значение  $b$  на характер графиков  $S_x$  и  $P_x$  практически не влияет, и оно должно быть определено независимым путем, например по механическим потокам рассеяния в грубозернистых фракциях (модель  $a = b > 0$ ).

При неравномерном поступлении рудного материала на интервале  $R - R_0$ , опуская громоздкие математические выкладки, укажем, что при некоторых соотношениях параметров максимум  $P'_x$  может лежать внутри рудного интервала, но в общем при  $a \geq b > 0$  точка  $x=R$  соответствует началу наиболее резкого спада на графике  $P'_x = f(S_x)$ .



Р и с . 2. Характер теоретических зависимостей  $P'_x = f(S_x)$  при различных соотношениях динамических параметров рудного (а) и породного (б) материала в литохимическом потоке рассеяния



Р и с . 3. Палетки (а,б) и номограмма (в) для решения обратной задачи по модели литохимического потока рассеяния с динамическим параметром  $a=b \geq 0$

При  $a > b = 0$  для интерпретации можно использовать формулы (I3) и (I4). Параметр  $a$  определяется точно так же, как в случае равномерно поступления рудного материала в водоток. Множитель  $\gamma'_{aj}$ , рассчитанный по формуле (I4), строго говоря, должен быть исправлен по формуле

$$\lambda'_{a\text{испр}} = \lambda'_{a2} \frac{e^u + 1}{(e^u - 1)},$$

где  $u = (a/2)(S_R - S_{R_0})$ .

Однако легко рассчитать, что при условии  $a(S_R - S_{R_0}) \leq 4$ , которое в реальных потоках обычно выполняется,  $\lambda'_a$  и  $\lambda'_{a\text{испр}}$  различаются не более чем в 1,3 раза.

Для  $a = b > 0$  поправки по сравнению с моделью равномерного поступления рудного материала оказываются идентичными, и для интерпретации практически можно применять формулы (I7) и (I8).

В экстремальном случае  $a \rightarrow \infty$ ,  $b \rightarrow \infty$  из выражения (7) получим

$$C'_x = k' \frac{dP_x}{dS}, \quad (22)$$

при  $R_0 \leq x \leq R$ ,  $C'_x = 0$

при  $x < R_0$  или  $x > R$ .

Аномальные содержания в потоке обнаруживаются только на интервале поступления рудного вещества, что соответствует модели А.Н.Боголюбова для отрезков потока, где весь аллювий представлен материалом ближайших склонов. Априорные представления о характере изменения  $dP_x/dS$  в этом случае чересчур загромождают модель. Формулу (22) целесообразно представить в виде

$$C'_x = k' M_{op}(x) / l_x,$$

где  $M_{op}(x)$  — линейная продуктивность склонового ореола по направлению от точки  $x$  водотока вверх по склонам;  $l_x$  — длина склонов. Количественная интерпретация выполняется на основе зависимости

$$P_{op} = \frac{1}{k'} \int_{R_0}^R C'_x l_x dx \approx \frac{1}{k'} \sum_{x=R_0}^R C'_x l_x \Delta x,$$

где  $\Delta x$  — шаг опробования потока рассеяния. Иначе говоря, соседние по маршруту опробования водотока точки не влияют друг на друга и для обработки результатов съемок по потокам рассеяния пригодны методики, используемые для обработки результатов съемок по вторичным ореолам с переменным размером элементарной площади, приходящейся на каждую точку опробования.

Выбор модели с теми или иными динамическими параметрами определяется в первую очередь фазой развития долины и миграционными свойствами рудных элементов. Для долин водотоков низких порядков, находящаяся в инстративной и пестративной фазах развития, при условии равенства динамических параметров  $a$  и  $b$  часто справедлива модель первого

приближения. Если рудные элементы интенсивно выщелачиваются из опробуемого аллювия, а рудные минералы проседают в ложе потока, более вероятна модель  $a > b = 0$ , на отрезках фиксации рудных элементов в аллювии из гидрохимического потока – модель  $b > a = 0$ . Для долин более высоких порядков либо находящихся в констративной фазе развития возможны модели  $a = b > 0$  и в более сложном случае  $a > b > 0$ , в крайне констративной фазе – модель  $a \rightarrow \infty, b \rightarrow \infty$ . Согласно представлениям А.Н.Боголюбова [1], последняя модель может оказаться справедливой для крайне инстративной фазы, когда поступающий со склонов мелкозем сразу же переходит во взвесь и уносится в водотоки более высоких порядков. Кроме априорных соображений, обоснованному выбору интерпретационной модели способствует вид наблюдаемых в реальных потоках зависимостей  $P'_x = f(S_x)$  (см. рис. 2). Для различия внешне похожих случаев  $a > b = 0$  и  $a = b > 0$  укажем, что характер убывания величины  $\ln P'_x$  на интервале  $S_x \geq S_R$  в первом случае линейный, а во втором – кривая  $\ln P'_x$  – вогнута вниз. Помимо рассмотренных выше способов решения обратных задач литохимических потоков рассеяния вручную, для произвольного соотношения динамических параметров решение может быть получено на ЭВМ методом подбора на основе формул (9) и (10). Интерпретация потоков рассеяния в пределах водотока проводится последовательно, начиная от его верховья. На интервале каждого следующего потока рассеяния из наблюдаемых значений  $P'_x$  – нужно вычитать составляющие продуктивностей всех предыдущих потоков, которые после интерпретации вышележащих потоков рассчитываются по соответствующим формулам  $P'_x$  в зависимости от параметров модели и величины  $S_x$ . Некоторые практические рекомендации по использованию моделей потоков рассеяния и примеры расчетов обратных задач по моделям были изложены нами в учебном пособии [2].

Модель Соловова–Шварова, как и предложенные выше модели, может быть выведена из наиболее общего выражения (5), если в качестве весовых функций взять убывающую показательную функцию следующего вида:

$$\omega_P(S_x, S) = \omega_{\text{пар}}(S_x, S) = (S/S_x)^{\alpha' - 1}$$

где  $\alpha' \geq 1$  – склоновый коэффициент аллювия;  $0 \leq S \leq S_x$ . Весовая функция (23) имеет много общего с весовой функцией, принятой с модели  $a = b > 0$ , при  $a S_x > 3$  и  $\alpha' > 2$ . Это приводит к близким оценкам потоков при  $\gamma > 3$  и  $\alpha' > 2$ . В то же время при  $\gamma < 2$  и  $\alpha < 1,5$  поправочные множители обеих моделей  $\lambda_\gamma$  и  $\lambda'_{\alpha'}$  имеют значения с разбросом в пределах  $\pm 1, 2-1, 3$  раза, и оценки потоков опять оказываются близкими. В предельном случае  $a=0$  и  $\alpha'=1$  та и другая модель сходятся к модели первого приближения. Можно также показать, что оценки по обеим моделям совпадают при  $S_{R0}=0$  и  $S_{R0} = \infty$ .

Таким образом, модель Соловова–Шварова по своим интерпретационным параметрам оказывается сходной с моделью  $a = b > 0$  и, следовательно, с моделью Поликарпочкина, которая математически взаимосвязана с моде –

лью  $a = b > 0$ . Отметим также, что, основываясь на уравнении (5), можно строить и иные модели литохимических потоков рассеяния, если это будет вызвано необходимостью наиболее адекватного описания реально существующих потоков. В частности, задавая весовые функции кусочно-непрерывными, можно моделировать потоки рассеяния в условиях, когда динамические характеристики водотока неодинаковы на различных его отрезках. Однако получение решения в явном виде может встретиться с непреодолимыми трудностями, поэтому такое моделирование предпочтительнее осуществлять численными методами на ЭВМ. Возможно также дальнейшее развитие моделей путем учета перераспределения материала по гранулометрическим фракциям, подобно тому как И.В.Поликарпочкин внес в свои модели уточнения, описывающие процесс измельчения обломочного материала по ходу его транспортировки [5].

Рассмотренные модели потоков рассеяния являются детерминированными и несут идеализированный характер. Реально выявляемые литохимические аномалии в донных осадках, конечно же, осложнены многочисленными мешающими факторами, в первую очередь ландшафтными. Поэтому, прежде чем приступать к количественной интерпретации, необходимо выполнять сглаживание данных и по возможности устранять влияние ландшафтных факторов. Количественной интерпретации с оценкой прогнозных ресурсов заслуживают только те аномалии, которые "очищены" от помех и рудная природа которых установлена. Кроме того, надо помнить, что математические модели литохимических потоков рассеяния нацелены на оценку продуктивности склоновых ореолов по результатам опробования донных осадков водотоков. А источниками склоновых ореолов могут быть объекты рудного типа и ранга: эродируемые рудные тела, месторождения, их первичные ореолы, сингенетично минерализованные породы и т.д. Поэтому очевидно, что задача перехода от продуктивности склонового ореола к прогнозной оценке количества руды представляет собой самостоятельную проблему, далеко выходящую за рамки настоящей статьи. Для дальнейшего развития математической теории литохимических потоков рассеяния представляется перспективным моделирование нестационарных литохимических потоков, которые возникают при селях, паводках и т.п., особенно в активных горных районах.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Боглюбов А.Н. Количественное выражение связи ореолов и механических потоков рассеяния в горных районах. // Литохимические поиски рудных месторождений. Алма-Ата: Наука, 1972. С.268-278.
2. Геохимические методы поисков и разведки месторождений полезных ископаемых. Количественная интерпретация литохимических ореолов и потоков рассеяния рудных месторождений: (Лабораторные работы Э, Ю) / Сост. Е.М.Квятковский, А.Г.Марченко. Л.: ЛПИ, 1986. С.24-32.

3. Инструкция по геохимическим методам поисков рудных месторождений. М.: Недра, 1983. 191 с.
4. Поликарпочкин В.В. Оценка рудопроявлений по их литохимическим потокам рассеяния. // Литохимические поиски рудных месторождений. Алма-Ата: Наука, 1972. С. 252-267.
5. Поликарпочкин В.В. Вторичные ореолы и потоки рассеяния. Новосибирск: Наука, 1976. 408 с.
6. Соловов А.П. Основы теории и практики металлотметрических съемок. Алма-Ата: Изд-во АН КазССР, 1959. 268 с.
7. Соловов А.П. Геохимические методы поисков месторождений полезных ископаемых: Учеб. для вузов. М.: Недра, 1985. 294 с.
8. Соловов А.П., Шваров Ю.В. Оценка оруденения по литохимическим потокам рассеяния. // Разведка и охрана недр. 1980. № 1. С. 25-30.
9. Шваров Ю.В. Интерпретация на ЭВМ литохимических потоков рассеяния. // Вестн. МГУ. Сер. 4., Геология. 1984. № 2. С. 58-63.

УДК 550.842:553.3

В.П.Бородин, И.Ф.Бровчук, В.Н.Астафьев

ОБОБЩЕНИЕ ПОИСКОВЫХ ГЕОХИМИЧЕСКИХ ДАННЫХ  
ПРИ ЛИТОХИМИЧЕСКИХ СЪЕМКАХ ПО ПОТОКАМ РАССЕЯНИЯ

Литохимические поиски по потокам рассеяния получили широкое распространение в горных и горно-таежных условиях восточных районов СССР. По данным этих работ возникает необходимость составления сводных геохимических карт, которые в сочетании с геологоструктурными картами могут служить долгосрочной основой для металлогенического прогнозирования. Практическое решение этой задачи путем построения мелкомасштабных геохимических карт в изоконцентрациях рудных элементов осложняется тем, что содержание элемента в аллювии зависит от распределения его содержаний в элювио-делювии в пределах всего водосборного бассейна, расположенного выше точки опробования аллювия, и поэтому не может непосредственно распространяться на склоны, прилегающие к опробованной точке гидросети [ 1 ].

Содержание рудного элемента в аллювии связывается с его количеством в пределах соответствующего водосборного бассейна на основе соотношения, предложенного А.П.Солововым [ 4 ]:

$$C'_x = \frac{C'_{x-1}S_{x-1} + \alpha' \Delta P_x + C'_\Phi \Delta S_x}{S_{x-1} + \alpha \Delta S_x}, \quad (I)$$

где  $C'_x$  и  $C'_{x-1}$  - содержания рудного элемента в смежных точках опробования  $x$  и  $x-1$ , из которых вторая лежит выше по течению водотока;  $S_x$  и  $S_{x-1}$  - площади водосборных бассейнов, соответствующие точкам  $x$  и  $x-1$ ;  $\Delta P_x$  - продуктивность вторичных ореолов рассеяния в пределах

площади  $\Delta S_x = S_x - S_{x-1}$ ;  $\alpha'$  - склоновый коэффициент аллювия;  $C_{\Phi}$  - фоновое содержание элемента в аллювии.

Умножая обе части на  $S_{x-1} + \alpha' \Delta S_x$ , соотношение (1) можно привести к виду

$$\alpha' \Delta S_x (C'_x - C'_{\Phi}) + S_{x-1} (C'_x - C'_{x-1}) = \alpha' \Delta P_x. \quad (2)$$

Суммируя обе части (2) по всем значениям  $x$  от  $x = 1$  в истоке водотока до  $x = n$  в его устье и принимая для простоты  $\Delta S_x = \text{const}$ , что соответствует аппроксимации формы водосборного бассейна прямоугольником, после несложных преобразований получим

$$\alpha' \Delta S_x \left( \sum_{x=1}^n C'_x - n C'_{\Phi} \right) + \sum_{x=1}^n S_{x-1} C'_x - \sum_{x=1}^n S_{x-1} C'_{x-1} = \alpha' \sum_{x=1}^n \Delta P_x.$$

учитывая, что  $\sum_{x=1}^n \Delta S_x = S_n$  - всей площади водосборного бассейна,  $\sum_{x=1}^n P_x = P_d$  - продуктивности вторичных ореолов рассеяния элемента в пределах площади  $S_n$ ,  $P = S_n (C - C_{\Phi})$ , где  $C$  и  $C_{\Phi}$  - соответственно среднее и фоновое содержания элемента в элювио-делювии в контурах  $S_n$ , и принимая  $\sum_{x=1}^n C_x = C^{-1}$ , получим

$$\bar{C}' - C'_{\Phi} + \frac{C_n - C'}{\alpha'} = \bar{C} - C_{\Phi}. \quad (3)$$

Из равенства (3) следует, что средние содержания элемента в аллювии и элювио-делювии (за вычетом фона) различаются на величину  $(C_n - C)/\alpha$ , которая может принимать как положительные, так и отрицательные значения в зависимости от характера размещения рудной минерализации в водосборном бассейне. Если рудный объект располагается в верховьях бассейна, то величина  $(C'_n - C')/\alpha' < 0$ , так как содержание элемента в аллювии будет минимальным в приустьевой точке за счет разубоживания рудного материала безрудным, поступающим в долину со склонов в средней и нижней частях бассейна. Если рудный объект находится в нижней части бассейна, то содержание элемента в приустьевой точке будет выше среднего содержания по всему водотоку, так как большая его часть при этом характеризуется фоновыми содержаниями. Площадь  $S_0$  поисковая литохимической съемкой по потокам рассеяния, представляет собой совокупность водосборных бассейнов различных порядков. Среднее содержание элемента в элювио-делювии в пределах  $S_0$  можно оценить как средневзвешенное по всем водосборным бассейнам, составляющим  $S_0$ . Поскольку распределение коренных рудных объектов в пределах поисковой площади, как правило, не зависит от морфологии речной сети, можно предположить, что для достаточно большого количества водосборных бассейнов положительные и отрицательные значения  $(C'_n - \bar{C}')/\alpha'$  в сумме будут близки к нулю. Это дает основание полагать, что для достаточно больших площадей  $S_0$  среднее содержание в аллювиальных отложениях будет сходиться по вероятности к его содержанию в элювио-делювии, т.е.

$$\lim_{S_0 \rightarrow \infty} (C - C'_{\Phi}) = k' \lim_{S_0 \rightarrow \infty} (C - C_{\Phi}),$$

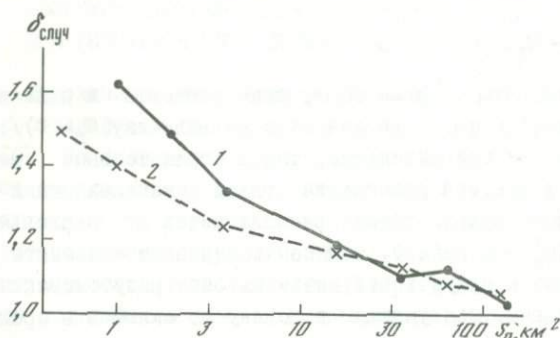
где  $k'$  — коэффициент пропорциональности, зависящий от индивидуальных свойств элемента.

Это предположение впервые было высказано А.П.Солововым и, как показали проведенные исследования, достаточно хорошо согласуется с эмпирическим материалом.

Сравнение средних содержаний рудных элементов в аллювии и в элювио-делювии при различных площадях осреднения было проведено на примере известного олово-серебряного рудного узла, расположенного в пределах Охотско-Чукотского вулканогенного пояса (ОЧВП). Площадь рудного узла ( $250 \text{ км}^2$ ) исследована литохимическими съемками по вторичным ореолам рассеяния (сеть  $500 \times 50 \text{ м}$ ) и по потокам рассеяния (плотность опробования 8 проб на  $1 \text{ км}^2$ ). По данным геохимических съемок, на площади рудного узла выделены геохимические аномалии серебра, олова, свинца, для которых было проведено осреднение исходной числовой информации окнами, размер которых варьировал от  $0,5 \times 1$  до  $12 \times 12 \text{ км}$ .

По осредненным данным рассчитаны средние случайные расхождения  $\sigma_{\text{случ}}^{\pm 1}$  по известной формуле [3].

Графики  $\sigma_{\text{случ}}$  на примере геохимических аномалий серебра, приведенные на рис. 1, свидетельствуют об уменьшении  $\sigma_{\text{случ}}$  с увеличением



Р и с . 1. Средние относительные расхождения содержаний серебра в аллювии и элювио-делювии в зависимости от окна осреднения при плотности опробования гидросети 1 проба (1) и 8 проб (2) на  $1 \text{ км}^2$

площади окна  $S_0$ . Графики  $\sigma_{\text{случ}}$ , рассчитанные при плотности опробования аллювия 8 проб на  $1 \text{ км}^2$  (масштаб

съемки 1:50 000) и плотности 1 проба на  $1 \text{ км}^2$  (масштаб 1:200 000), обнаруживают существенные расхождения только при небольшой площади окна осреднения и с увеличением последнего проявляют устойчивую тенденцию к сближению, практически сливаясь при  $S_0 > 25 \text{ км}^2$ . По-видимому, это обусловлено тем, что для достаточно больших  $S_0$  величина  $\sigma_{\text{случ}}$  определяется главным образом параметрами речной сети и мало зависит от количества точек, осредняемых в пределах  $S_0$ . Сходные результаты получены для геохимических аномалий олова и свинца.

Следует отметить, что среднее относительное расхождение  $\sigma_{\text{случ}}$  зависит также от величины склонового коэффициента аллювия  $\alpha'$  и степени неоднородности геохимического поля в элювиально-делювиальных образованиях, которая может быть оценена величиной стандартного множе-

ля  $\epsilon$  (величина  $\epsilon$  рассчитывалась для средних содержаний элемента при  $S_0 = 0,5 \text{ км}^2$ ). Для исследования динамики  $\sigma_{\text{случ}}$  как функции  $\alpha'$  и  $\epsilon$  было проведено моделирование содержаний элемента на площади  $70 \text{ км}^2$ , характеризующейся реальным эрозионным расчленением, типичным для ОЧВП, с плотностью гидросети постоянных и временных водотоков около 2 пог.км на  $1 \text{ км}^2$  [2]. Площадь ( $70 \text{ км}^2$ ) была разбита на элементарные ячейки квадратной формы размером  $0,25 \text{ км}^2$ , в каждой из которых содержание элемента определялось как случайная логарифмически нормально распределенная величина, что отвечает обычно достаточно хорошей аппроксимации геохимических аномалий рудных элементов логнормальным распределением. Далее по формуле (1) осуществлялся переход к содержанию элемента в аллювии в точках, расположенных на расстоянии 500 м друг от друга. Величина  $\delta_{\text{случ}}$  рассчитывалась по 30 случайным реализациям моделируемого геохимического поля. Моделирование геохимических полей осуществлялось на микро-ЭВМ ДЗ-23 с помощью программы, составленной на языке Бейсик с использованием генератора псевдослучайных логнормально распределенных чисел с математическим ожиданием 10 при различных стандартных множителях (2; 3,2; 6).

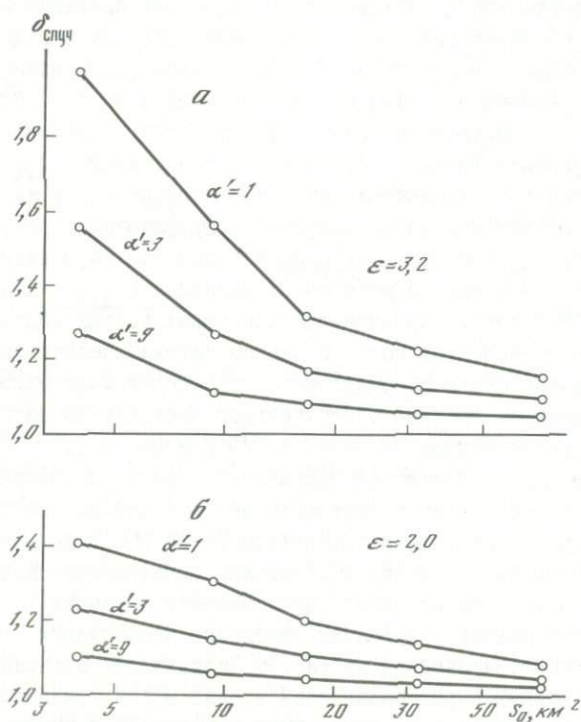
Полученные на модельных примерах данные характеризуют уменьшение среднего относительного расхождения  $\delta_{\text{случ}}$  между средними содержаниями в аллювии и элювио-делювии с увеличением площади осреднения  $S_0$  при различных значениях параметров  $\alpha'$  и  $\epsilon$ . При этом установлено, что  $\delta_{\text{случ}}$  возрастает с увеличением стандартного множителя  $\epsilon$  т.е. степени неоднородности геохимического поля, и уменьшается с увеличением склонового коэффициента аллювия  $\alpha'$ . Эмпирическая кривая  $\delta_{\text{случ}}$ , рассчитанная для реальных геохимических аномалий серебра при  $\epsilon \approx 2$  и  $\alpha' \approx 2$  (рис.1), достаточно хорошо согласуется с графиками на рис.2. Приведенные графики  $\delta_{\text{случ}}$  могут быть использованы для определения рационального окна осреднения при заданной величине  $\delta_{\text{случ}}$  и известных оценках  $\epsilon$  и  $\alpha'$ . В качестве приемлемого для практических задач составления сводных геохимических карт по данным литохимических съемок по потокам рассеяния можно рекомендовать окно осреднения площадью более  $25 \text{ км}^2$ , при котором среднее относительное расхождение на примере исследованного рудного узла при  $\epsilon \approx 2$  и  $\alpha' \approx 2$  менее 1,2.

Таким образом, обобщение литохимических съемок по потокам рассеяния в условиях ОЧВП путем составления мелкомасштабных геохимических карт целесообразно проводить в масштабе 1:500 000 и мельче.

Геохимическая карта олова, построенная осреднением скользящим окном  $5 \times 5 \text{ км}$  данных региональной литохимической съемки масштаба 1:200 000, проведенной в пределах одного из оловорудных районов Северо-Востока СССР, приведена на рис.3. Подавляющее большинство известных месторождений и рудопроявлений входит в контуры выделенных геохимических аномалий олова. Содержания элемента в аллювии, осредненные скользящим окном, прямо пропорциональны среднему содержанию элемента в коренных породах в контуре того же окна. Это позволяет, с

учетом коэффициентов пропорциональности  $k$  и  $k$  [4] соответствующих переходу от потока рассеяния ко вторичному ореолу рассеяния и от вторичного ореола рассеяния к коренному оруденению, проводить оценку количества металла в аномалиях и тем самым повысить надежность геологических прогнозов.

В результате исследований на моделях и реальных геохимических аномалиях установлена сходимость средних содержаний рудных элементов в элювио-делювии и аллювии по мере увеличения площади осреднения. Эта закономерность может быть использована для обоснования рационального окна осреднения при построении сводных геохимических карт по результатам литохимических съемок по потокам рассеяния. Составление сводных геохимических карт содержаний рудных элементов в аллювии предложенным способом не требует вычисления водосборных площадей, что существенно упрощает их построение, особенно с помощью ЭВМ. Для условий горных районов Охотско-Чукотского вулканогенного пояса обобщение результатов региональных литохимических съемок масштаба 1:200 000 по потокам рассеяния целесообразно проводить в масштабе 1:500 000 и мельче при окне осреднения площадью 25 км<sup>2</sup>. Геохимическая карта, построенная указанным способом для известного рудного района (рис.3, ха-



Р и с . 2. Средние относительные расхождения средних содержаний элемента в аллювии и элювио-делювии в зависимости от площади осреднения  $S_0$  и различных значений параметров  $\alpha'$  и  $\epsilon$

Р и с . 3. Геохимическая карта рудного района

1-3 - содержания олова (в п.  $10^{-3}\%$ ):  
I - I-2, 2 - 2-4, 3 - 4; 4 - известные месторождения и рудопроявления

рактируется высокой информативностью и может быть использована для решения задач качественного и количественного металлогенического прогнозирования.

#### ЛИТЕРАТУРА

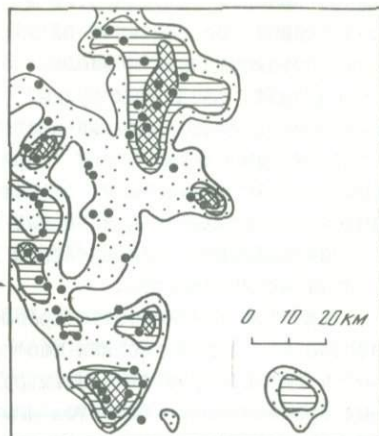
1. Б о р о д и н В.П. Методика мелкомасштабного обобщения данных литохимических съемок по потокам рассеяния. // Методы разраковки и оценки перспектив геохимических аномалий и аномальных площадей. Магадан: СВКНИИ ДВНЦ АН СССР, 1982. С.33-35.
2. Б р о в ч у к И.Ф., Б о р о д и н В.П., Б о р о д и н В.А., Д е м и н А.Д. Эффективность литохимических съемок по потокам рассеяния при геохимических поисках масштаба 1:50 000 в условиях Северо-Востока СССР. // Геохимия рудных районов. Благовещенск, АмКНИИ, 1986. С.112-113.
3. Инструкция по геохимическим методам поисков рудных месторождений. М.: Недра, 1983. 191 с.
4. С о л о в о в А.П. Геохимические методы поисков месторождений полезных ископаемых: Учеб. для вузов. М.: Недра, 1985. 294 с.
5. Т е п л ы х В.И., П и н е г и н Ю.Д., Ф е ф е л о в В.Б. и др. Разраковка территории Северо-Востока по степени перспективности на основе комплексирования геохимических и геофизических методов. // Рациональная последовательность работ при геохимических поисках. М.: ИМПРЭ, 1982. С.25-27.

УДК 550.41

Н.Н.Трофимов, А.И.Рычков, Г.Г.Потоя, Е.А.Маркелова

#### ЗНАЧЕНИЕ ВЫСОКОПОДВИЖНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ УВЕЛИЧЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЛИТОХИМИЧЕСКИХ ПОИСКОВ СКРЫТОГО ОРУДЕНЕНИЯ

В настоящее время основной целью геохимических поисков является обнаружение скрытого и погребенного орудения, поэтому на первый план выдвигается задача увеличения глубинности поисковых методов. Одним из направлений решения этой задачи является привлечение в качестве индикаторов новых, не используемых ранее элементов, характеризую-



1 2 3 4

щихся высокой подвижностью в гипогенных условиях. Как показали исследования, проведенные на жильных свинцово-цинковых, медноколчеданных, золоторудных, молибден-вольфрамовых, оловорудных и других месторождениях различных рудных формаций, внешняя зона ореолов постмагматических месторождений представлена иодом, бромом, хлором, ртутью, сурьмой, мышьяком, бором, барием, часто серебром, щелочными металлами. Все эти элементы участвуют в эндогенном рудообразовании, обладают высокой подвижностью и входят в низкотемпературную ассоциацию химических элементов, характерную для фронтальных зон эндогенных ореолов рудных месторождений.

Основной особенностью ореолов высокоподвижных элементов, установленной на всех изученных месторождениях, является их преимущественное и широкое развитие в надрудных горизонтах. Протяженность надрудных ореолов этих элементов намного превышает протяженность ореолов рудных элементов и их спутников. Имеется целый ряд примеров выявления глубокозалегающего оруденения по ореолам высокоподвижных элементов на поверхности при отсутствии позитивной информации по ореолам прямых элементов-индикаторов.

Особое место среди этих элементов занимает иод, ореолы которого имеют максимальную надрудную протяженность и зафиксированы на всех изученных постмагматических рудных месторождениях независимо от их состава. Высокая миграционная способность иода связана главным образом с его полным рассеянием в природе, что, в свою очередь, определяется его физико-химическими свойствами. Главное значение при этом имеет исключительно большой ионный радиус ( $2,2 \cdot 10^{-10}$  м), практически полностью исключающий возможность изоморфного вхождения иода в кристаллические решетки других минералов, и низкий ионный потенциал (0,45), указывающий на ограниченные энергетические возможности при построении собственной кристаллической решетки. Ювенильные минералы иода неизвестны, все его природные соединения являются газообразными, возникают и существуют только в поверхностных условиях. Иод образует наиболее протяженные ореолы, мало зависящие от физико-химических свойств пород. Он возглавляет ряды зонального отложения и проникает через литологические экраны, недоступные для других элементов. Наложенные ореолы иода фиксируют оруденение в скрытопогребенном залегании под лёссовыми отложениями, надвигами, моренами, оползнями и т.д. при мощности аллохтона до 100 м.

Ниже приведены результаты изучения ореолов высокоподвижных элементов на месторождениях различных рудных формаций с целью определения их роли в увеличении эффективности литохимических поисков скрытого оруденения. Основное внимание уделено ореолам иода как менее изученным и практически неприменимым в практике поисковых работ.

Литохимические ореолы жильных свинцово-цинковых месторождений изучены на месторождениях Северо-Осетинского полиметаллического пояса и Квайсинского рудного поля. Месторождения этой группы сопровож-

даются ореолами Pb, Zn, Cu, Mn, Ag, J, Hg, В, Sb, Co, Ni, Mo, Bi. Иод, ртуть, сурьма и бор образуют типичные надрудные ореолы, обладающие значительными размерами и контрастностью и позволяющие обнаруживать глубокозалегающие, близповерхностные и слабоэродированные рудные тела. Установленное простирание ореолов этих элементов вверх от руды 300 м. Ореолы иода, ртути, сурьмы и бора существенно увеличивают свои размеры и параметры по восстанию рудной зоны и имеют преимущественное и широкое развитие в надрудных горизонтах. Из рудных элементов наибольшей надрудной протяженностью обладают на месторождении ореолы цинка - 100-150 м.

На рис. I показано погребенное залегание рудных зон, залегающих в глинистых сланцах и перекрытых оползнем карбонатных пород мощностью 40-60 м. Содержание подвижного иода в гумусовом горизонте почв отчетливо "высвечивает" все три рудные зоны под карбонатным оползнем; аномальных концентраций рудных элементов и их спутников по профилю не фиксируется.

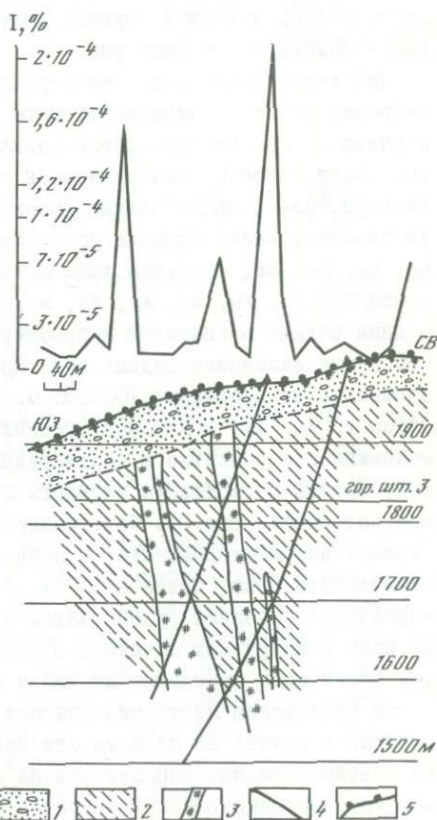
**Р и с . I.** Наложенные ореолы иода над рудными зонами месторождения Кадат

1 - оползневые отложения карбонатных пород; 2 - песчано-глинистые сланцы; 3 - рудные зоны; 4 - рудное тело; 5 - точки отбора проб

В строении ореолов жильных свинцово-цинковых месторождений Северной Осетии установлена отчетливая вертикальная зональность. В целом ряд зональности для месторождений в гранитах и порфиритах следующий: J, Sb, Hg, В, Ag, Mn, Zn, Cu, Pb, Ni, Co, Mo, Bi.

Для месторождений в песчано-сланцевой покрывке он практически такой же - все ряды возглавляются высокоподвижными элементами, на первом месте во всех рядах зональности стоит иод. Наибольшей контрастностью в изменении с глубиной обладают коэффициенты зональности, в числителях которых также высокоподвижные элементы:  $I/Pb$ ,  $Hg/Pb$ ,  $PbSb/PbZnCu$ .

Значения последнего коэффициента в надрудных сечениях эндогенных ореолов в  $10^5$  раз выше, чем в сред-



нерудных. Различные уровни гипергенных ореолов наиболее контрастно различаются по величине обобщенного коэффициента  $\text{IbHg/Pb Zn}^2$ . Значение его постепенно возрастает от 0,0001 в ореоле близповерхностного Эгидского месторождения до 0,3400 в ореоле слепого рудопоявления Октябрьское.

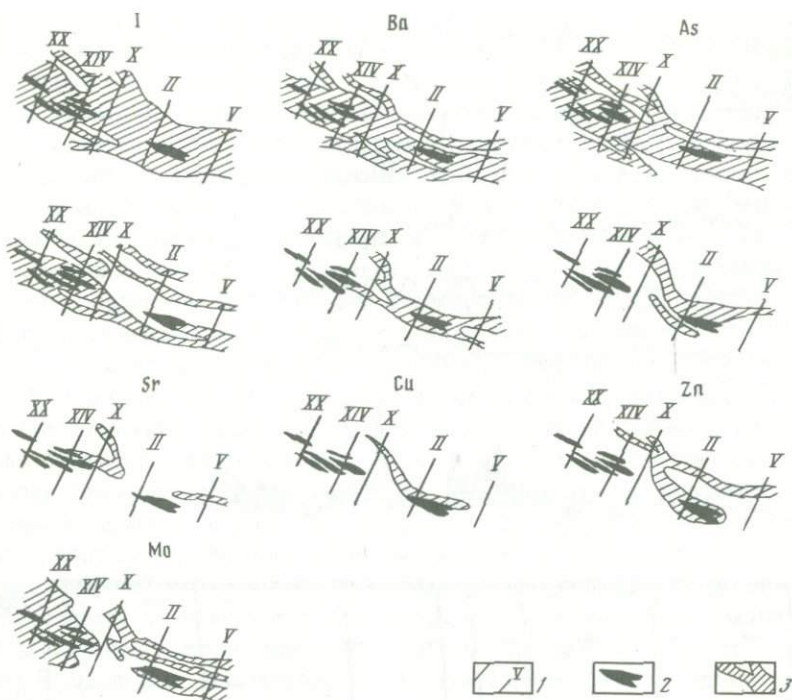
Изучение геохимического поля Квайсинского месторождения в целом подтвердило выводы о первостепенном значении высокоподвижных элементов для поисков скрытого свинцово-цинкового оруденения. Кроме того, на месторождении установлено, что подвижная форма иода на всей изученной площади практически полностью отсутствует на фоновых участках коренных вулканогенно-осадочных пород (менее  $0,4 \cdot 10^{-6}\%$ ), присутствуя в определенных концентрациях лишь в ореольных зонах. Этот фактор может служить критерием определения рудной природы литохимических аномалий. При изучении гипергенных ореолов таким критерием служат аномальные концентрации подвижного иода в почвах.

Ореолы колчеданных месторождений изучены на месторождении Кизил-Дере, рудопоявлениях Горного Дагестана и медноколчеданном месторождении Подольское в Башкирии.

Литохимические ореолы месторождения Кизил-Дере изучены по пяти разрезам на весь разведанный интервал. Из высокоподвижных элементов изучено только распределение подвижного иода, мышьяка, бария и серебра. Содержание сурьмы оказалось ниже предела чувствительности анализа (0,003%), на остальные высокоподвижные элементы пробы не анализировались. Месторождение сопровождается ореолами Cu, Zn, Pb, Mo, Sn, Ag, As, Ba, Sr, I. Четко выделяются две группы элементов. К первой относятся Cu, Pb, Zn, Ag, Sn, Mo. Ореолы этих элементов сопровождают рудные залежи по падению и простиранию и практически замыкаются вместе с выклиниванием рудных тел. Протяженность надрудных ореолов этих элементов не превышает 100–150 м. Ко второй группе в основном относятся I, Ba, As, в меньшей степени – Sr; ореолы этих элементов имеют максимальное развитие в верхнерудной и надрудной частях рудных залежей, хорошо регистрируя элементы второй группы в скрытом и погребенном залегании (рис.2). Иод фиксирует на поверхности сложным ореолом целиком все месторождение; в пределах общего ореола контуры второго аномального поля (более  $2 \cdot 10^{-6}\%$ ) отчетливо регистрируют выходы и вертикальные проекции рудных залежей и трассируют разломы. Ширина ореола иода в надрудных сечениях 30–250 м. На одном из разрезов надрудный ореол иода прослежен на 700 м вверх от руды.

На Подольском месторождении иод оказался единственным элементом, который в почвах на поверхности контрастно регистрирует рудные залежи в вулканогенных породах девона на глубине 700 м, при наличии кремнистого экранирующего горизонта, пачки перекрывающих рудомещающих вулканогенно-осадочных отложений и яркой коры выветривания (рис.3).

Рассеянное (несвязанное) нахождение иода в породах и рудах обуславливает свободную его миграцию и после формирования месторождения



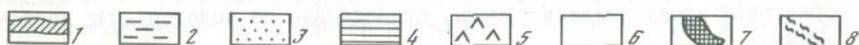
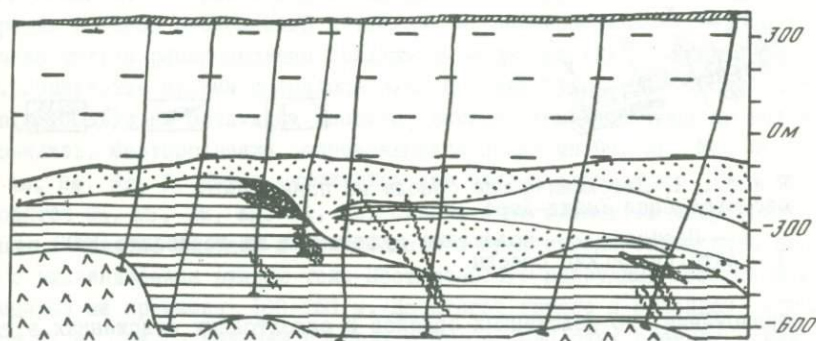
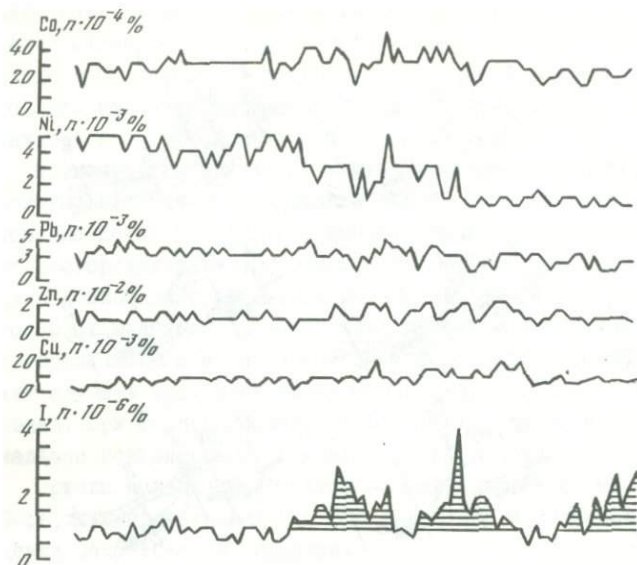
Р и с . 2. Литохимические ореолы на поверхности месторождения Кизил-Дере

I - Профили; 2 - положение рудных тел на горизонте 1300 м; 3 - литохимические ореолы

и образование его наложенных ореолов в аллохтонных отложениях, а также проникновение через различные литологические экраны. Хорошим подтверждением этому явились работы, проведенные на золоторудных месторождениях.

Месторождение близповерхностной золото-серебряной формации приурочено к площади развития меловых вулканогенно-осадочных пород, которые схематично делятся на четыре толщи (снизу вверх): андезитовую, дацитовую, андезитобазальтовую и липаритовую. Рудовмещающими породами являются в основном андезиты нижней толщи, а верхняя толща кислых вулканогенных пород, имеющая широкое развитие в районе, является хорошим экраном для литохимических ореолов, ограничивает их развитие и проявление на поверхности и обуславливает низкую эффективность литохимических поисков скрытого оруденения в районе.

Все изученные на месторождении высокоподвижные элементы (I, As, Sb, Ba, Ag) проявляют тенденцию к широкому и преимущественному развитию в верхне- и надрудных горизонтах. Лучший индикатор на месторождении



Р и с . 3. Графики содержаний элементов по профилю в южной части Подольского месторождения

1 - четвертичные отложения и кора выветривания юрского возраста; 2 - вулканогенно-осадочные породы удугауской свиты; 3-5 - рудовмещающие породы: 3 - туфы трахидацитового состава, 4 - туфы и лавы липарит-дацитового состава, 5 - базальты; 6 - липарит-дацитовые и дацитовые порфиры; 7 - рудные залежи; 8 - зоны интенсивного дробления пород

- иод. Он проникает через литологический экран кислых пород мощностью 120 м, недоступный для ореолов всех остальных изученных элементов, и образует наиболее четкую, непрерывную и полную картину аномального поля месторождения (рис.4). Ряд вертикальной зональности мес-

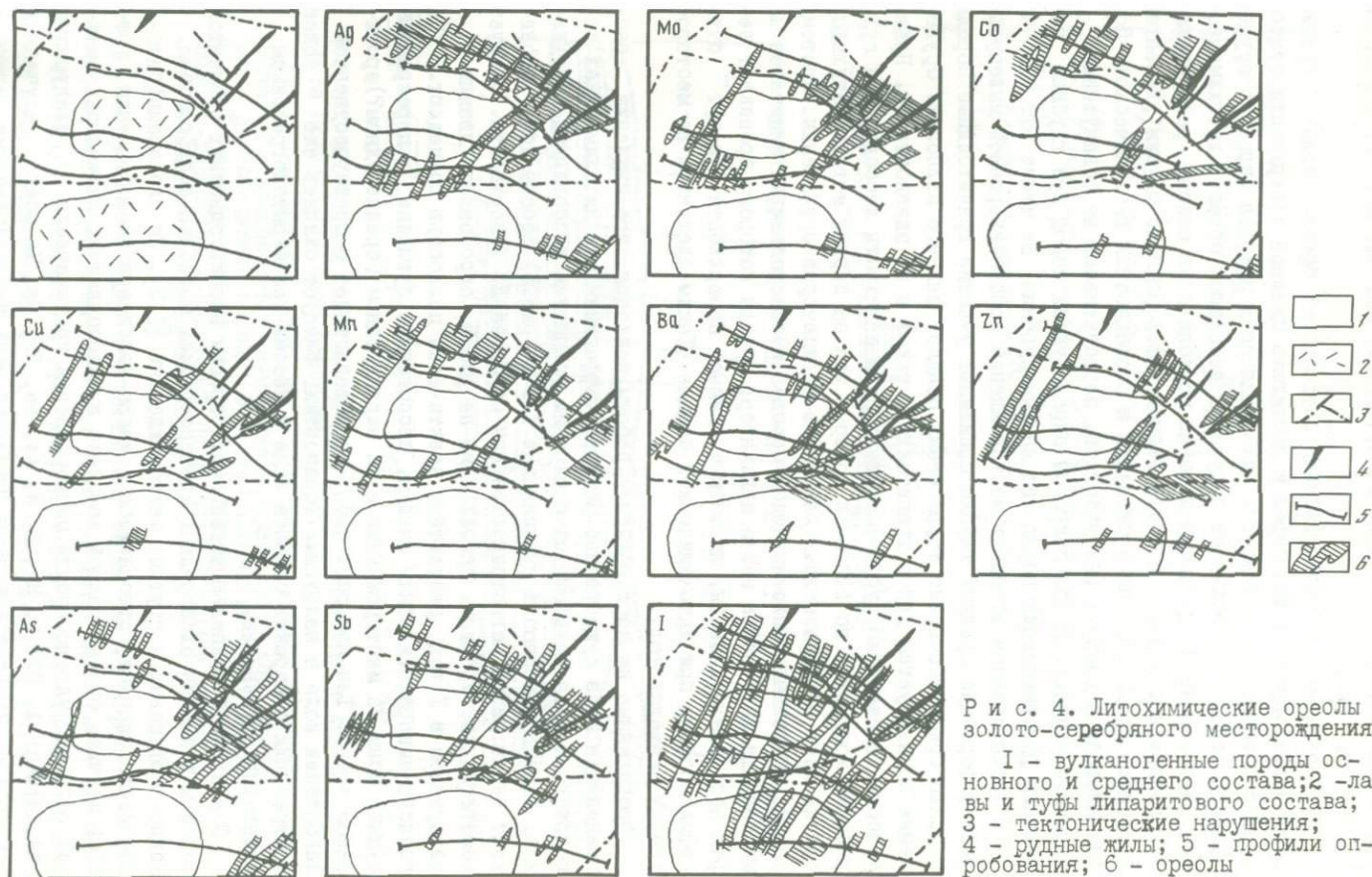
торождения имеет вид (сверху вниз): I, As, Sb, Ba, Ag, Pb, Mn, В, Ni, Sn, Zn, Co, (Mo, Cu).

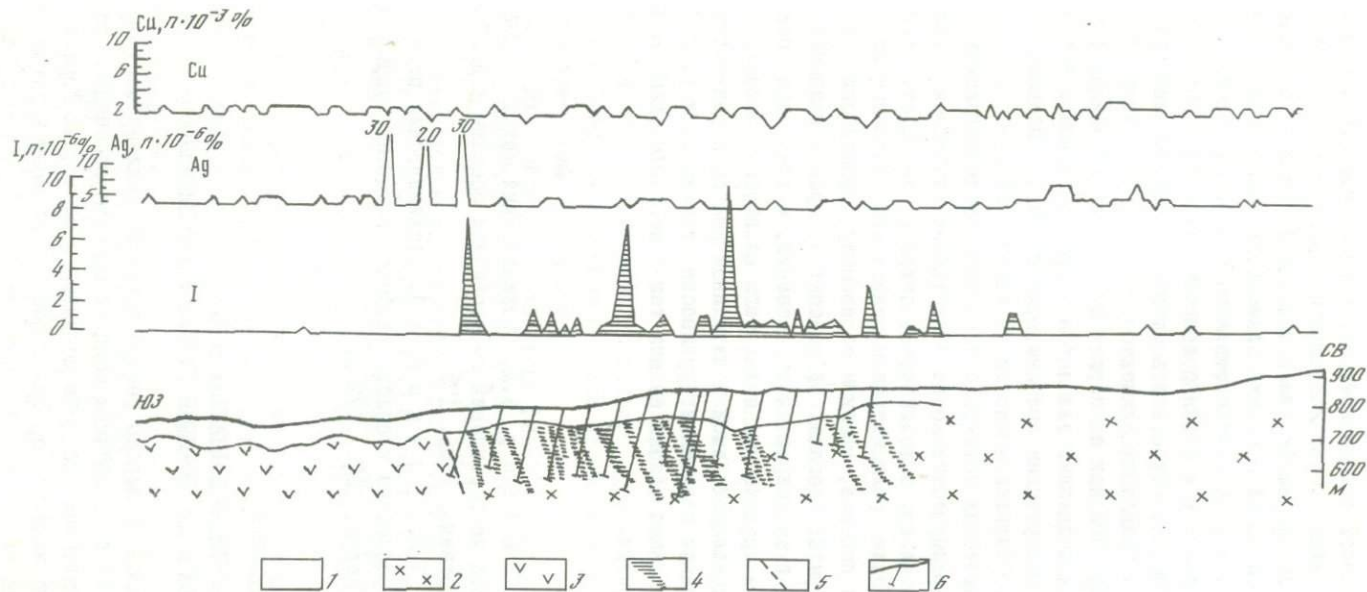
Установленная на месторождении способность ореолов иода проникать через экран кислых пород и достигать дневной поверхности существенно повышает эффективность литохимических поисков скрытого оруденения в районе. Проведенное попутно в небольшом объеме литохимическое опробование прилегающей площади позволило на основе распределения содержания иода, при очень бедной информации по другим элементам, составить представление о строении и особенностях геохимического поля площади и выявить ряд участков, перспективных на обнаружение скрытого оруденения под покровом экранирующих пород при глубине залегания рудовмещающих пород (по данным бурения) не менее 500 м.

В геологическом строении месторождения золото-кварцевой малосульфидной формации средних глубин принимают участие гранитоидные породы и толщи преимущественно терригенных осадков нижнего палеозоя. Оруденение локализуется как в гранитоидах, так и в их экзоконтакте. Практически повсеместно рудовмещающие породы перекрыты лёссовидными суглинками мощностью до 120 м, в которых уже на первых метрах затухают ореолы всех общепризнанных элементов-индикаторов оруденения. Поэтому весьма актуальным было изучение ореолов высокоподвижных элементов на месторождении с целью найти индикатор, ореолы которого проникают через лёссовые отложения, достигают дневной поверхности и могут быть зафиксированы при литохимической съемке. Таким элементом на месторождении оказался иод.

Проведенные на месторождении работы показали, что изучение распределения иода существенно повышает эффективность литохимии как поискового метода на площадях с широким развитием лёссовидных суглинков. Даже при мощности суглинков в 120 м (рис.5) ореолы иода проникают через них и регистрируются при опробовании поверхности. Следует заметить, что профиль, приведенный на рис.5, опробовался дважды с интервалом в 1 год, результаты практически полностью совпадают. По геолого-минералогическим данным, лёссовидные суглинки перекрывают рудные зоны на месторождении в их верхнерудном (среднерудном?) эрозионном срезе. Так как опыт работ свидетельствует о преимущественном накоплении иода в надрудных горизонтах, следует ожидать еще более контрастных и широких ореолов иода в лёссах при скрытопогребенном залегании оруденения.

С различной степенью детальности ореолы высокоподвижных элементов изучены также на оловорудных месторождениях молибден-вольфрамовых, медно-порфировых и ртутных месторождениях [1,2]. На олововольфрам-овом месторождении, относящемся к кварц-касситеритовой формации, удалось изучить очень большой комплекс высокоподвижных элементов; внешняя зона надрудного ореола месторождения представлена следующими элементами: I, Cl, F, Hg, P, В, As, Na, Rb, Cs. На всех изученных месторождениях доказана первостепенная роль высокоподвижных элемен-





Р и с . 5. Графики содержаний элементов по профилю через золоторудное месторождение

I - лёссовидные суглинки; 2 - граносиениты; 3 - туфы среднего состава, туфопесчаники; 4 - кварцевые жилы, в том числе рудоносные; 5 - тектонические нарушения; 6 - скважины

тов, из которых главная роль принадлежит иоду, для увеличения глубины и эффективности литохимических поисков скрытого оруденения. На самых верхних эрозионных уровнях скрытое оруденение фиксируется только ореолами высокоподвижных элементов при фоновом содержании рудных компонентов. Поисковый комплекс элементов-индикаторов должен обязательно включать в себя высокоподвижные элементы, которые при поисках глубокозалегающего и экранированного оруденения приобретают самостоятельное значение. Глубинность метода будет определяться изучением ореолов высокоподвижных элементов. Фактический материал свидетельствует, что при поисках по первичным ореолам глубинность метода с изучением высокоподвижных элементов уверенно повышается до 500 м и более, поиски по гипергенным ореолам эффективны при мощности рыхлого чехла до 100 м (большие мощности не изучались).

Методика литохимических поисков с изучением высокоподвижных элементов направлена преимущественно на обнаружение глубокозалегающего оруденения, следовательно, с увеличением детальности работ, т.е. по мере приближения к руде, роль методики понижается. Основное ее применение — на стадии поисков, главным образом при проведении опережающих поисков на закрытых площадях, в районах с широким развитием аллохтонных отложений и экранирующих образований, а также при поисках по первичным ореолам оруденения, ожидаемого на глубине более 200–300 м. На стадиях предварительной и детальной разведки она может использоваться для оценки перспектив рудоносности флангов и глубоких горизонтов, для выявления слепых рудных тел и корректировки направления разведочных работ.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Судов Б.А., Миллер А.Д. Геохимический метод поисков скрытых эндогенных месторождений по первичным ореолам иода. Тбилиси: Сабчота Сакартвело, 1986. 175 с.
2. Трофимов Н.Н., Рнчков А.И. Геохимические поля элементов широкого рассеяния и поиски глубокозалегающих рудных месторождений. М.: Недра, 1979. 172 с.

УДК 550.849.082.75

С.Г.Алексеев, А.С.Духанин

### ДИФУЗИОННОЕ ИЗВЛЕЧЕНИЕ ПОДВИЖНЫХ ФОРМ НАХОЖДЕНИЯ МЕТАЛЛОВ ДЛЯ ПОИСКОВ СКРЫТОГО ОРУДЕНЕНИЯ

В современных условиях широко распространены геохимические методы поисков месторождений по вторичным солевым ореолам рассеяния. Эти методы основаны на извлечении из почв металлов в различных формах нахождения и позволяют выделять ореолы рассеяния элементов рудных объектов, залегающих на глубинах 100 м и более [7]. С учетом среды оп-

робования выделяются различные методы: почвенно-гидрохимический [5], сорбционно-солевой [1], частично-фазовый [4], метод по формам нахождения [3]. Проведение работ указанными методами включает ряд общих технических приемов: на исследуемых участках отбирают образцы почв, из которых производят водные, солевые или кислотные вытяжки, определяют в них концентрации интересующих элементов и по распределению этих концентраций делают вывод о наличии или отсутствии наложенных ореолов рассеяния рудных объектов.

Указанные методы обладают рядом общих недостатков:

1. Вытяжка характеризует образец почвы не в естественном залегании и не в момент отбора проб, а во время проведения самой вытяжки. Существующее в почве в естественном залегании равновесие между формами нахождения элементов нарушается уже при отборе проб, а за время их хранения сдвигается в сторону закрепления подвижных форм, что может исказить результаты. Кроме того, приливание к образцу почвы раствора также смещает равновесие между формами нахождения элементов в сторону растворения труднорастворимых соединений, что также искажает результаты наблюдений.

2. В применяемых методиках производится исследование ограниченно-го и сравнительно небольшого объема почвы (обычно не более 100 г), что приводит к погрешностям, связанным с неравномерным распределением подвижных форм нахождения химических элементов в почве.

3. Методики проведения вытяжек трудоемки, один человек исследует в день 20-30 образцов, что снижает производительность метода и требует наличия высококвалифицированного персонала. Во всех случаях необходима операция фильтрования или отстаивания раствора, что также увеличивает время исследований.

Метод диффузионного извлечения (МДИ) [8] ставит своей задачей частично устранить названные недостатки.

Сущность метода заключается в следующем: В изучаемую среду помещается специальное устройство - элементоприемник (ЭлПР), в который под действием диффузионных сил происходит извлечение характерных для этой среды и способных к перемещению компонентов. Проводя через определенное время анализ состава ЭлПР, судят о составе изучаемой среды.

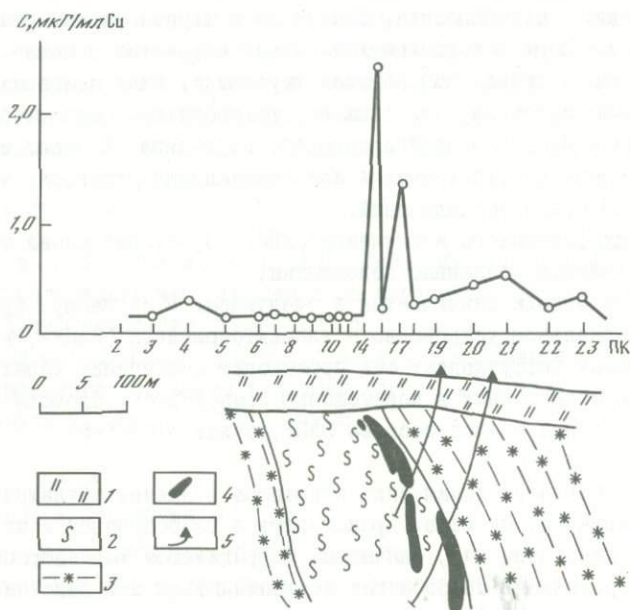
Процесс переноса химических элементов в элементоприемник имеет сложный характер. Он может происходить в газообразной и жидкой фазах почвы под действием сил, связанных с градиентом концентрации компонентов. Перемещение ионов может осуществляться под действием возникающих диффузионных потенциалов и пр. В зависимости от поставленных задач ЭлПР могут иметь различную конструкцию. Накопление ионов металлов может осуществляться в твердой фазе ЭлПР - ионообменной смоле [6]. Однако применение такой конструкции не освобождает от операции смыва сорбированных металлов со смолы и, кроме того, значительно (до

нескольких месяцев) увеличивает время, необходимое для отбора проб, Сократить время, необходимое для исследований, можно за счет накопления элементов непосредственно в растворе электролита.

Элементоприемник в этом случае представляет собой герметически закрытый сосуд из полупроницаемой мембраны, в который залит раствор электролита. Применяя электролиты различного состава, можно производить эффективное извлечение из почв химических элементов в формах нахождения, отличающихся по силе связи с твердой фазой, заряду ионов и другим свойствам. Отбор химических элементов из почв в естественном залегании вызывает минимальное преобразование их форм нахождения, так как исключает операцию хранения образцов. Воспроизводимые и достоверные результаты можно обеспечить, выбирая размеры элементоприемника и время исследований и, таким образом, регулируя обрабатываемый объем почвы.

Метод диффузионного извлечения может применяться для решения задач: разбраковки геофизических аномалий, прослеживания погребенных рудных объектов на флангах месторождений, поисков участков, перспективных на нахождение руд и т.д.

В настоящее время метод опробован в условиях Рудного Алтая, Центрального Казахстана, Узбекистана, Карелии и других районов с целью



Р и с . I. Результаты наблюдений методом диффузионного извлечения на участке I

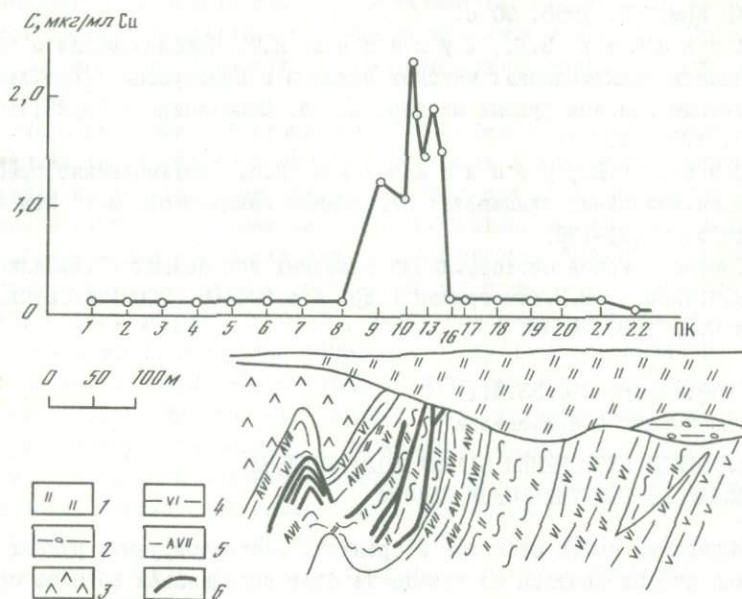
I - рыхлые отложения; 2 - серицито-кварцевые сланцы; 3 - порфиroidы; 4 - массивные руды полиметаллического состава; 5 - геологоразведочные скважины

поиска полиметаллических, пегматитовых, редкометалльных, золоторудных месторождений. Ниже рассмотрены результаты наблюдений на двух участках.

На первом участке (рис.1) два слепых рудных тела залегают согласно в углисто-глинистых сланцах. Одно из рудных тел выклинивается в 15 м, другое - в 140 м от поверхности коренных пород. Участок перекрыт аллохтонными отложениями мощностью 40 м. По данным исследований, рудные тела полиметаллического состава фиксируются аномальным извлечением меди. При этом локальная аномальная зона совпадает с проекцией рудного тела на дневную поверхность. Аномальное извлечение меди составляет 1-2,4 мкг/мл при фоне 0,2 мкг/мл.

На втором участке (рис.2) профиль задан над серией сближенных рудных тел, залегающих согласно в толще серицит-кварцевых сланцев. Рудные тела выходят под толщу рыхлых отложений мощностью 60-80 м. Методом диффузионного извлечения выделяется аномалия меди, пространственно совпадающая с проекцией рудных тел на дневную поверхность. Интенсивность аномалии составляет до 2,3 мкг/мл при фоне 0,15 мкг/мл.

Приведенные примеры свидетельствуют о возможности использования МДИ для поисков скрытого полиметаллического оруденения. Метод характеризуется простотой выполнения и высокой экспрессностью. Результаты



Р и с . 2. Результаты наблюдений методом диффузионного извлечения на участке 2

I, 2 - рыхлые отложения: I - песчано-глинистые, 2 - глинисто-галечные; 3 - порфириды; 4 - рассланцованные диоритовые порфириды; 5 - хлорит-кварц-плагиоклазовые сланцы; 6 - полиметаллические руды

могут быть получены на следующий день после начала исследований на участке, что особенно важно для задания поисковых геологических скважин.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Албул С.Г., Горьковец В.Г., Спиоров Г.Г. и др. Сорбционно-солевой метод поисков рудных месторождений. М.: Ун-т дружбы народов им.Патриса Лумумбы, 1978. 86 с.
2. Антропов Л.И. Теоретическая электрохимия. М.: Высш.шк. 1975. 560 с.
3. Антропова Л.В. Формы нахождения элементов в ореолах рассеяния рудных месторождений. Л.: Недра, 1975. 144 с.
4. Вострокнутов Г.А., Юшков Ю.Н. Применение методов частично-фазового анализа при литохимических поисках в условиях Урала. // Литохимические поиски рудных месторождений по их гипергенным ореолам и потокам рассеяния. Алма-Ата: Наука, 1968. С. 124-126.
5. Долуханова Н.И. Опыт применения гидрохимической съемки на медно-молибденовом месторождении Армянской ССР. Ереван: Изд-во АН Арм.ССР, 1958. 90 с.
6. Лукашев В.К., Лукашев К.И. Использование и эффективность геохимических методов поисков в Белоруссии. // Геохимические методы поисков рудных месторождений. Новосибирск: Наука, 1981. Ч. I. С. 179-188.
7. Саэт Ю.Е., Несвижская Н.И. Геохимические ореолы в неозловияльных ландшафтах. // Геохимия ландшафтов. М.: Изд-во МГУ, 1975. С. 151-178.
8. Способ поисков месторождений полезных ископаемых / Г.В. Милков, Б.Ф. Чванов, В.Н. Виноградов и др. А.с. 894660 (СССР). // Оpubл. в Б.И. 1981, № 48.

УДК 550.842:681.3(553.411)

Ю.Г. Шестаков, С.И. Леонтьев

#### АЛГОРИТМ ПЕРЕОЦЕНКИ СТАРЫХ ЗОЛОТОРУДНЫХ ПОЛЕЙ ПО ГЕОХИМИЧЕСКИМ ДАННЫМ

Выявление новых объектов в пределах эксплуатируемых рудных полей должно обеспечиваться не только за счет наращивания объемов проводимых поисково-оценочных работ, но и за счет переосмысления накапливаемой информации о закономерностях формирования и геохимической зональности оруденения по обрабатываемым месторождениям. В статье освещаются результаты работ по оценке перспектив одного из золоторудных полей Красноярского края. Последовательность проведения работ, испо-

льзование метода оценки прогнозных ресурсов и способа обработки имеющейся информации могут оказаться полезными при ведении аналогичных работ в других районах и на другие виды полезных ископаемых. Переоценка имеющейся геолого-геохимической информации осуществлена на основе использования монотонно меняющихся геохимических показателей [2], принципа геохимического и геометрического подобия генетически однотипных месторождений [3], способа выявления слабых комплексных ореолов оруденения [4].

Изучаемое рудное поле представляет собой вулканокупольную структуру, сложено порфиритами и их туфами, туфобрекчиями, углеродистыми кварц-хлоритовыми сланцами с прослоями мраморизованных известняков. Породы прорваны небольшими изометричными массивами гранитоидов и рассеяны многочисленными (более 30% площади) дайками протеробазитов. Мощность четвертичных отложений в зависимости от формы рельефа составляет 1-30 м. Рудоносные кварцевые жилы приурочены к концентрическим трещинам отрыва, концентрическим трещинам скола и радиальным сколовым трещинам. Оруденение представлено малосульфидным кварцевым типом. Выявлено более 240 жил мощностью от сантиметра до нескольких метров, протяженностью по простиранию от десятков метров до нескольких километров. Две жилы отрабатываются, около 40 эксплуатировались или разведаны с различной степенью детальности. Многие жилы выявлены по свалам кварца, прослежены отдельными канавами и шурфами. Прогнозные ресурсы поля, по существующим представлениям изучавших его геологов, невысоки.

Для выявления количественных критериев оценки рудных сечений жил по элементам типоморфного комплекса на основе данных погоризонтного опробования исследована эндогенная вертикальная зональность одной из отрабатываемых жил. Соседняя жила использовалась в качестве контрольного объекта. При обработке данных по программе "Ню-2" [1] получены "частные" ряды, а затем и обобщенный ряд зонального отложения элементов (снизу вверх):  $In-Cd-Zn, Au-Cu-Ba-Ag-Bi-Ag-Pb-Sb$ . Из общего числа выявленных монотонно убывающих с глубиной показателей геохимической зональности 1-3-го порядков для оценки уровней среза изучаемых жил выбрано десять 3-го порядка. Все геохимические показатели характеризуются устойчивостью на нескольких разрезах, значительным размахом и отражают положение элементов в ряду зональности. Характер геохимических показателей может быть представлен в общем виде:  $\frac{Pb, Ag}{In, Cd} \frac{Sb, Bi}{Zn, Au} (Cu, Ba, Au)$ , где в скобках - элементы, образующие с элементами числителя знаменатель, а с элементами знаменателя - числитель геохимических показателей.

Опробованные интервалы эталонной жилы представляют неполную зональную колонку оруденения, в связи с чем возможные значения показателей в эродированной и недоразведанной ее частях получены экстраполяцией имеющихся значений параболы 3-го порядка, уменьшающимися по

сравнению с линейной регрессией занижение среза для глубоко эродированных и завышение для вскрывающихся объектов. Надежность выявленных показателей зональности по эталонной жиле проверена путем таксации уровней оруденения контрольного объекта. Полученные значения оценок показали хорошую и удовлетворительную сходимость с их истинным положением.

Использование монотонно изменяющихся с глубиной геохимических показателей зональности позволило ранжировать жилы рудного поля по степени эрозионного среза и получить модели изменения содержаний золота, мощностей, протяженностей по простиранию, линейной и площадной продуктивностей от величины уровня среза. Для жил в начальной стадии вскрытия ( $0,2 < \bar{z} < 0,4$ ) величины всех перечисленных показателей меньше характерных для средней части зоны оруденения ( $\bar{z} = 0,4; 0,6$ ), а для глубокоэродированных ( $0,6 < \bar{z} < 0,8$ ) - больше свойственных низележащим горизонтам. Поправочные коэффициенты для оценки ожидаемых средних содержаний и протяженностей жил по простиранию в зависимости от степени их среза приведены в табл.

Поправочные коэффициенты для средних содержаний  
и протяженности жил по простиранию

Поправочный множитель	Условный уровень $z$							
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
К среднему содержанию	3,7	2,1	1,5	1,2	1,0	1,00	0,92	0,75
К протяженности по простиранию	5,0	3,2	1,7	1,3	1,0	0,97	0,95	0,71

Метод учета монотонно меняющихся показателей позволяет оценивать эрозионный срез, но не дает масштаба оруденения (крупный объект, уничтоженный наполовину, представляет больший интерес, чем вскрывающийся мелкий). Учитывая это, оценка величин прогнозных ресурсов обследованных жил осуществлена на основе принципа геометрического и геохимического подобия генетически однотипных объектов. Непосредственному использованию формул оценки прогнозных ресурсов и протяженностей жил по падению на основе такого метода препятствовал разнородный характер информации по оцениваемым объектам, отражающий специфику ведения разведочных работ в старых рудных районах.

Имеющиеся геологоразведочные данные по жилам поля разделены на шесть групп: 1) имеются данные о средних содержаниях рудного элемента, мощностях и протяженностях жил по простиранию; 2) вместо данных о средних содержаниях отмечаются лишь значения размаха; 3) вместо данных о средних мощностях есть значение размаха; 4) нет данных ни о средних содержаниях, ни о средних мощностях (имеются значения размаха); 5) нет данных о протяженностях по простиранию (жилы подсечены одиночными канавами, или шурфами); 6) содержания золота ниже предела обнаружения анализа.

Недостающие параметры жил 2-4-й групп оценивались с помощью регрессионного анализа. Коэффициенты уравнения регрессии получены в результате обработки материалов по жилам группы I. Для оценки возможных средних содержаний золота в жиле уравнение имеет вид  $\bar{C} = -0,0404 \bar{C}^2 + 1,860 \bar{C} + 1,21$ , а мощностей  $\bar{m} = -0,5156 \bar{m}^2 + 1,825 \bar{m} - 0,09$ , где  $\bar{C}$  и  $\bar{m}$  — средние геометрические из крайних значений размаха содержаний и мощностей. Недостающая характеристика протяженности жил группы 5 определялась по формуле  $L_{\text{объекта}} = \kappa_m L_{\text{эталона}}$ , где  $\kappa_m = \frac{M_{\text{объекта}}}{M_{\text{эталона}}}$  — коэффициент подобия.

Учитывая специфику полезного ископаемого для оценки прогнозных ресурсов рудного поля введен условный эталонный объект, геометрически подобный одной из обрабатываемых жил. Протяженность его по простиранию принята 650 м, по падению 450 м, мощность составляет 0,4 м, содержание золота 10 усл.ед. По запасам металла такой условный объект соответствует мелкому месторождению золота. Алгоритм оценки прогнозных ресурсов жил рудного поля включает следующие операции: определение недостающих средних содержаний и мощностей; введение поправки на возможные содержания для жил с  $z < 0,5$ ; определение линейной продуктивности и возможной протяженности по простиранию; вычисление коэффициентов подобия, возможной протяженности по падению и прогнозных ресурсов. При наличии геологических предпосылок некоторые жилы, совпадающие по простиранию и получившие в прошлом самостоятельные номера и названия, объединены в единые тела, а то увеличило их общую оценку.

По такой схеме была проведена оценка прогнозных ресурсов 184 жил рудного поля. Апробация принятой методики оценки осуществлена путем сравнения полученных цифр с данными разведки и эксплуатации для хорошо изученных жил. Расхождения полученных оценок с известными колеблются в пределах  $\pm 1,5$  раза и в среднем составляют 1,17, что свидетельствует о хорошей сходимости результатов.

С учетом гипсометрии выходов жил на поверхность проведена реконструкция эродированных и недоразведанных на глубину частей жил рудного поля, оценен размах протяженности промышленного оруденения и определен средний уровень среза исследуемых жил. По этим данным оруденение оцениваемого рудного поля эродировано примерно наполовину от первоначально существовавшего, что определяет возможность обнаружения в его пределах жил, не имеющих выхода на поверхность. Анализ числа известных жил на единицу площади с различными гипсометрическими отметками показывает резкое уменьшение их числа на отметках 1200 м и менее, что является следствием изменения условий их выявления (с отметок 1200 м и менее на площади рудного поля начинается лесная растительность, проективное покрытие до 95% и горно-дуговые почвы сменяются на более мощные лесные дерново-подзолистые, что резко затрудняет выявление кварцевых жил по свалам).

Поиск мест возможной локализации слепого оруденения осуществлен на основе выявления аномалий комплекса сопутствующих оруденению элементов по данным литохимических съемок прежних лет (работы выполнялись в 1958-1962 гг., масштаб их 1:10 000, разведочная сеть 100x40 м, частично 200x40 м). Сопутствующие оруденению элементы установлены по данным опробования руд эталонного объекта (содержание золота определялось спектральным и пробирным анализами). Значимые положительные связи между логарифмами содержаний золота (пробирный анализ) установлены с логарифмами содержаний свинца (0,66), меди (0,56), цинка (0,51), висмута (0,51), серебра (0,67), кадмия (0,52), мышьяка (0,30), сурьмы (0,44), индия (0,41). Коэффициент корреляции логарифмов содержаний ведущего компонента руд, по данным пробирного и спектрального анализов, составляет 0,79 (косвенное доказательство объективности результатов спектрального анализа).

В рыхлых отложениях над эталонными объектами (использованы данные по нескольку сотен проб) значимые связи из числа элементов, по которым проводился анализ, сохраняются для серебра, свинца, меди, цинка, мышьяка. Указанные элементы использованы в дальнейших работах. С помощью ЭВМ отстраивались поэлементные карты сглаженных содержаний рудного и сопутствующих элементов при различных радиусах осреднения, карты аддитивных и мультипликативных ореолов, а также карты комплексного показателя, учитывающего сумму центрированных и нормированных значений аномальности комплекслируемых элементов. Карта сглаженных значений последнего лучше других согласуется с известными жилами рудного поля, отражает места техногенных аномалий, свидетельствует о наличии возможного нахождения рудоносных жил под элювиально-делювиальными образованиями (выявлен ряд аномальных участков, где к настоящему времени жил не установлено). Ревизия карт геохимических съемок прежних лет показала, что аномальным значениям по таким участкам соответствуют повышенные содержания - от трех до шести элементов, учитываемых показателем. По ряду участков в 1980 г. проведена профильная съемка с расстояниями между профилями в 100-150 м и между точками 10-20 м. Наличие повышенных значений комплексного показателя подтвердилось.

В 1982-1983 гг. две аномальные площади были покрыты геохимической съемкой масштаба 1:5000. На основе полученных данных в пределах одной площади (юго-восточная часть поля) десять жил были объединены в пять объектов; на второй (юго-западная часть) выявлена цепочка аномалий комплексного показателя. При сглаживании его значений окном 150-50 м (три профиля, пять точек) разобщенность отдельных аномалий исчезает - устраняется следствие пересечения зоны дайками. При геологическом обследовании выделенной зоны найдены свалы рудного кварца по площади восьми из девяти аномальных узлов. К югу от выявленной зоны расположена цепочка известных жил, которые, по полученным дан-

ным, представляются отдельными фрагментами единого объекта, имеющего размах оруденения по гипсометрии рельефа более 300 м. Прогнозные ресурсы зоны юго-западной части рудного поля сопоставлены с запасами каждой из обрабатываемых в настоящее время жил.

Переоценка перспектив рудного поля, по нашему мнению, должна включать работы двух видов: подготовительные – накопление информации о закономерностях локализации оруденения и основные – оценочно-поисковые. Последовательность действий при выполнении основных работ может быть следующей: обработка материалов литохимической съемки прежних лет с построением карт сглаженных значений комплексного показателя; геологическое обследование выявленных аномалий и подтверждение наличия повышенных содержаний рудного и сопутствующих элементов профильной съемкой; покрытие аномальных участков детальными геохимическими съемками; задание горных выработок с целью проверки оруденения в коренном залегании; определение линейных продуктивностей и на их основе коэффициентов подобия выявленных объектов эталонному; получение оценок возможной протяженности их по простиранию и падению, оценки прогнозных ресурсов выявленных объектов.

Хотелось бы отметить, что работа по оценке перспектив рудного поля курировалась А.П.Солововым, и авторы, пользуясь случаем, выражают ему как одному из ведущих специалистов по геохимическим методам поисков свою искреннюю признательность и благодарность.

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Николаев В.А., Соловов А.П., Шваров Ю.В. Новые программы для исследования зональности рудных месторождений. // Применение автоматизированных систем и ЭВМ при геохимических исследованиях. Алма-Ата: КазИМС, 1977. С.16-20.
2. Соловов А.П., Матвеев А.А. Геохимические методы поисков рудных месторождений: Учеб. пособие. 2-е изд. М.: Изд-во МГУ, 1985. 232 с.
3. Соловов А.П., Милыев С.А. Оценка генетически однотипных месторождений по и М // Состояние и задачи геохимических поисков рудных месторождений в Казахстане. Алма-Ата: КазИМС, 1981. С. 213-218.
4. Шестаков Ю.Г., Леонтьев С.И. О возможном пути повышения информативности литохимических данных при оценке рудных полей // Математическая обработка геохимических данных. Новосибирск: Наука, 1986. С.94-98.

## СПОСОБ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА АНАЛИЗА

Объективная оценка качества анализа требуется всегда, она служит одним из основных гарантов успешного решения соответствующих задач. Особую значимость приобретает проблема оперативной оценки качества при выполнении геохимических работ, поскольку эти исследования основаны на обработке обширных массивов результатов анализа, уровнем которых во многом и определяется качество проведенных исследований.

Математическая статистика дает целый ряд критериев, позволяющих оценивать качество аналитических работ. К их числу относятся, например, среднеквадратическая погрешность, дисперсия  $D$ , случайная относительная погрешность  $\delta_{сл}$ , систематическое расхождение  $\delta_{сист}$ , коэффициент корреляции  $r$  и др. Важное значение имеет правильность анализа, подробно рассмотренная, например, в монографии А.И. Гавришина [2]. Однако ни один из этих параметров, взятый в отдельности, не может быть необходимым и достаточным для более или менее полной характеристики качества аналитических измерений. Для этого надо рассматривать только их совокупность. Однако психологически сложно воспринимать группу чисел, пытаясь давать им некоторую однозначную оценку, а объективное сравнение таких оценок тем более затруднительно.

При решении некоторых частных задач, например для оперативной оценки работы лаборатории и сравнения качества анализа различных химических элементов, методов или лабораторий, целесообразно использовать некоторую искусственную величину (назовем ее условно фактором качества), в которую бы входили представляющие интерес параметры. Поскольку правильность анализа, играющую очень важную роль, исследовать весьма непросто, иногда допустимо ограничиться вычислением характеристик, относящихся только к воспроизводимости. Удобно, чтобы область определения рассматриваемой функции находилась между 0 и 1. Наилучшее качество (анализ с нулевыми погрешностями) принимается равным 1, а наихудшее (бесконечно большие погрешности) — 0.

В геохимии при оценке воспроизводимости по парным наблюдениям используют две величины:  $\delta_{сист}$  и  $\delta_{сл}$  [3].  $\delta_{сл}$  принимает значения от 1 до  $\infty$ , а  $\delta_{сист}$  может быть как меньше, так и больше 1 ( $0 < \delta_{сист} < \infty$ ). Если  $\delta_{сист} < 1$ , то это говорит только о том, что величина первичных измерений в среднем ниже вторичных. Поскольку понятие "первичные" и "вторичные" анализы условно, без всякого ущерба для значения погрешности в случае, если  $\delta_{сист} < 1$ , можно использовать ее обратную величину и всегда приводить  $\delta_{сист}$  к виду  $\delta_{сист}^* > 1$ .

Тогда введенный нами фактор качества может быть записан следующим образом:

$$\Phi K(I) = \frac{I}{\delta_{сл} \delta_{сист}^*} \quad (1)$$

Если и случайная погрешность, и систематическое расхождение отсутствуют, т.е.  $\delta_{\text{сист}} = 1$  и  $\delta_{\text{сл}} = 1$ , то  $\Phi K(1) = 1$  и качество анализа идеальное. Однако если любой из этих параметров будет стремиться к бесконечности, то это обратит в 0 качество анализов даже в случае равенства другого 1.

Но использование только  $\delta_{\text{сист}}$  и  $\delta_{\text{сл}}$  для оценки качества двукратного анализа выборки проб, как правило, недостаточно. Дело в том, что даже если в качестве первой и второй групп результатов анализа взять числа из таблицы случайных величин, то и тогда вычисленная случайная погрешность не может принять слишком большого значения, в то время как  $\delta_{\text{сист}}$  будет близким к 1. На практике размах значений, в том числе и при очень низком качестве анализов, часто бывает намного ниже, чем у величин из таблиц случайных чисел. Это может создавать иллюзию благополучия, тогда как на самом деле анализ проведен с нулевым качеством. Для примера приведем "погрешности", рассчитанные для 30 пар взятых из таблицы случайных чисел, изменяющихся от 1 до 99:

$$\delta_{\text{сист}} = 1,15, \quad \delta_{\text{сл}} = 1,76,$$

а коэффициенты корреляции для них:

$$r = 0,228, \quad r_{\text{крит}} = 0,312.$$

(q=0,1)

Как и следовало ожидать, вычисленный коэффициент корреляции ниже критического значения, т.е. корреляция незначима.

Если выборка содержит результаты анализа проб, дифференцированных по содержаниям, то оправданно оценивать коэффициент корреляции между парными наблюдениями. Это условие выполняется при значимой величине природной дисперсии  $D_{\text{пр}}$  (или условно  $D_{\text{пр}} \gg D_{\text{ан}}$ , где  $D_{\text{ан}}$  - дисперсия анализа), т.е. практически всегда за редкими исключениями, например в случае многократного анализа одиночной гомогенной пробы.

Известен графический метод представления двойных результатов выборки проб [1]. Это простой и весьма эффективный способ визуальной оценки качества воспроизводимости. Форма, размеры и ориентация облака точек в координатах  $C_1$  и  $C_2$  (результаты первичных и повторных определений) позволяют обнаружить систематическое расхождение, увидеть, велики или малы случайные ошибки, и существует ли корреляция между первичными и повторными результатами анализа, которая может быть только положительной. Но количественная оценка этих параметров по графическому изображению весьма затруднена. Использование коэффициента корреляции при вычислении фактора качества существенно повышает его значимость.

Предлагается следующий способ расчета, учитывающий критическое значение коэффициента корреляции  $r_{\text{крит}}$  при данной выборке и заданном уровне надежности. Относительная величина коэффициента корреляции

$$r_{\text{отн}} = \frac{r - r_{\text{крит}}}{1 - r_{\text{крит}}}, \quad (2)$$

где  $r$  - вычисленное значение коэффициента корреляции. Должно выполняться условие  $(r - r_{\text{крит}}) \geq 0$ ; если  $r < r_{\text{крит}}$ , то полагаем, что  $(r - r_{\text{крит}}) = 0$ .

Величина фактора качества с учетом коэффициента корреляции определяется из уравнения

$$\Phi_K(\Pi) = \frac{r_{\text{отн}}}{\delta_{\text{сист}}^* \delta_{\text{сл}}} \quad (3)$$

Хорошо известно, что величины погрешностей, при прочих равных условиях, зависят также и от уровня определяемых концентраций. Чем ближе этот уровень к пределу обнаружения, тем величины погрешностей больше. Следовательно, разным величинам погрешностей (при разных концентрациях) может отвечать одинаковый уровень качества анализа. Поэтому желательно рассчитывать фактор качества, принимая во внимание функцию величины погрешности от содержания для данного элемента. К сожалению, по крайней мере для массовых методов эмиссионного спектрального анализа; применяемых в геохимии, эти функции остаются неизвестными.

В работе [4] представлен один из вариантов такой функции:

$$\text{RSD} = 2^1 - 0,51 \log C, \quad (4)$$

где RSD - относительное стандартное отклонение (коэффициент вариации), а  $C$  выражено в десятичных дробях, например  $10^{-4}\%$  записывается как  $10^{-6}$ . Двойка в основании степени указывает на минимальную погрешность 2%, если данным методом анализируется чистое вещество:  $C=100\%$  или  $C=1$ . Авторами показано, что в общем случае эта функция хорошо соответствует эмпирическим данным и не зависит от особенностей методики анализа, если рассматриваются методики, близкие по своим метрологическим характеристикам.

Минимальная рассчитываемая согласно уравнению погрешность должна соответствовать фактически достижимой для данного варианта методики для определенного элемента. Так как трудно подобрать величины параметров уравнений таким образом, чтобы уравнения точно соответствовали многочисленным конкретным случаям, по-видимому, проще использовать графические построения зависимости случайных относительных погрешностей от уровня концентрации на основе эмпирических данных. Поправка на минимальную погрешность для заданного уровня концентраций может иметь вид

$$K = \frac{\delta_{\text{сл}}}{\delta_{\text{сл}}^*}, \quad (5)$$

где  $\delta_{\text{сл}}^*$  - относительная случайная погрешность, снятая с графика для среднего значения данных концентраций;  $\delta_{\text{сл}}$  - фактически полученная погрешность. По условию  $\delta_{\text{сл}} \geq \delta_{\text{сл}}^*$ . Фактор качества в этом случае определится из уравнения

$$\Phi_K(\Pi) = \frac{r_{\text{отн}}}{K \delta_{\text{сист}}^*} \quad (6)$$

Для примера в таблице приведены вычисленные значения некоторых статистических параметров и величины  $\Phi K(I)$  и  $\Phi K(II)$  по двум лабораториям, значительно отличающимся друг от друга по общему уровню, но проводившим анализ одним методом (массовый атомный оптический эмиссионный спектральный анализ) и одним способом выполнившим контроль (парный анализ выборки проб). Данные таблицы показывают, что значения  $\Phi K$  не всегда соответствуют уровню  $\delta_{сл}$  или  $r$ , т.е. значения фактора качества не обязательно самое высокое там, где  $\delta_{сл}$  минимально, и наоборот.  $\Phi K$  более объективно характеризует качество, так как учитывает все рассматриваемые параметры одновременно. Следует ожидать, что он будет и более устойчивым, чем любой из отдельно взятых параметров, поскольку вероятность случайного отклонения в одну сторону всех составляющих факторов качества одновременно ниже, чем у единичного параметра.

Для того, чтобы обоснованно установить предельное значение  $\Phi K(II)$ , ниже которого анализы следует считать браком, необходимо прежде накопить некоторый опыт. Временно же можно условно принять в качестве самого низкого значения  $\Phi K(II)$  0,3.

Величины погрешностей и факторы качества анализов  
двух лабораторий

Параметр	Mn	Co	Ti	Ni	V	Mo	Cu	Pb	Ag	Zn
I-я лаборатория										
$n^*$	60	55	59	58	55	56	60	56	42	47
$\delta_{сист}$	1,57	2,18	1,02	2,55	1,85	1,82	5,20	2,75	1,47	1,21
$\delta_{сл}$	1,29	1,18	1,29	1,28	1,24	1,31	1,49	1,36	1,59	1,29
$r$	0,841	0,919	0,677	0,674	0,827	0,786	0,969	0,936	0,909	0,517
$r_{отн}$	0,798	0,897	0,591	0,587	0,781	0,729	0,961	0,919	0,880	0,362
$\Phi K(I)$	0,494	0,389	0,760	0,306	0,436	0,419	0,129	0,267	0,428	0,641
$\Phi K(II)$	0,394	0,349	0,449	0,180	0,341	0,305	0,124	0,245	0,377	0,232
2-я лаборатория										
$n$	35	33	35	35	35	35	35	35	32	35
$\delta_{сист}$	1,11	1,07	1,05	1,00	1,10	1,08	1,12	1,20	1,04	1,10
$\delta_{сл}$	1,16	1,20	1,08	1,11	1,16	1,13	1,14	1,19	1,14	1,17
$r$	0,965	0,935	0,803	0,922	0,908	0,743	0,933	0,930	0,915	0,943
$r_{отн}$	0,952	0,908	0,728	0,893	0,873	0,646	0,907	0,903	0,879	0,921
$\Phi K(I)$	0,777	0,779	0,882	0,901	0,784	0,819	0,783	0,700	0,843	0,777
$\Phi K(II)$	0,739	0,707	0,642	0,805	0,684	0,529	0,710	0,632	0,741	0,716

\*  $n$  - число проб в выборке.

Предлагаемый способ оценки качества, не претендуя на большую строгость и полноту, тем не менее может служить достаточно простым и удо-

бым инструментом, позволяющим свести целый ряд параметров, определяющих качество аналитических измерений, к одному числу и облегчить тем самым оценку анализов и их сравнение. Заметим также, что в зависимости от конкретных задач и условий отдельные параметры, входящие в формулу ФК, могут быть исключены или заменены другими, более подходящими, либо добавлены новые.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. М.: Наука, 1969. 576 с.
2. Гавришин А.И. Оценка и контроль качества геохимической информации. М.: Недра, 1980. 287 с.
3. Инструкция по геохимическим методам поисков рудных месторождений. М.: Недра, 1983. 191 с.
4. Kenneth W. Boyer. Analytical chemistry. 1985. Vol.57. N 2. P. 454-459.

УДК 550.84.092.2:553.3(571.56+571.65)

А.А.Матвеев, Ю.Н.Николаев

### ВТОРИЧНЫЕ ОРЕОЛЫ РАССЕЙНИЯ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ СЕВЕРО-ВОСТОКА СССР

По ландшафтно-геохимическим условиям рудоносные территории Северо-Востока СССР принадлежат к горно-таежным и горно-тундровым районам с устойчивой, сплошной мерзлотой. Ее мощность на равнинах достигает 230-270 м, под вершинами гор - 500-600 м. Многолетняя мерзлота является важнейшим фактором, влияющим на формирование, морфологию вторичных ореолов рассеяния и распределение в них химических элементов. В.М.Питулько [4] указывает на две основные формы влияния мерзлоты на морфологию вторичных ореолов рассеяния: ограничение подвижности элементов в устойчиво мерзлой зоне криогенеза и увеличение рассеяния их в сезонно-талом слое (СТС). в результате криогенных процессов происходит выпучивание рыхлого материала и сортировка его по крупности, что определяет наличие на поверхности рыхлых образований значительного количества щебенки, ниже - суглинистого материала. С этими же процессами связано образование полигональных почв, пятен-медальонов, являющихся продуктами вымораживания материала более глубоких горизонтов. Другими специфическими особенностями зоны криогенеза являются солифлюкционные перемещения рыхлого материала склонов и образование солифлюкционных террас. Все это может приводить к образованию смещенных ореолов рассеяния, к заметному ослаблению и погребению вторичных остаточных ореолов рассеяния ниже по склону [3].

Отмеченные ландшафтные особенности территории Северо-Востока СССР послужили поводом для неоднократных и достаточно бесплодных высказываний о трудностях и якобы малой эффективности проведения поисковых

литохимических съемок в этих районах, не подкрепленных сколько-нибудь достаточным объемом региональных и поисковых работ. Между тем высокая эффективность литохимических поисков рудных месторождений по вторичным остаточным ореолам рассеяния в районах Крайнего Севера была доказана 50 лет тому назад работами Н.И.Сафронова, А.П.Соловова, М.И.Рохлина и др. Примером может служить открытие по вторичным ореолам рассеяния олова знаменитых "Календарных" жил Валькумейского оловорудного месторождения (А.П.Соловов, 1938 г.), определившее его промышленную оценку. Однако это не привело к широкому и планомерному внедрению геохимических методов в практику геологопоисковых работ в этих районах и до начала 70-х годов основным методом поисков месторождений золота, олова и ртути на Северо-Востоке СССР оставалось шлиховое опробование аллювиальных отложений. В специальной литературе неоднократно отмечались преимущества литохимических методов поисков перед шлиховыми. Универсальность поисков по потокам и вторичным ореолам рассеяния проявляется не только для "нешлиховых" элементов (серебро, медь, цинк, свинец, молибден, никель, мышьяк и др.), но в частности, и для золота.

Исследование параметров и геохимических характеристик вторичных ореолов рассеяния рудных месторождений проводилось нами в районах горно-таежных и в меньшей степени горно-тундровых ландшафтов с многолетней мерзлотой на многочисленных золоторудных и оловорудных выявленных ранее участках, в том числе в пределах известных рудных полей и месторождений. Отбор проб проводился по серии профилей с шагом 10 м (реже 20 м) из деятельного слоя с глубины 15-20 см, реже 30-40 см.

В результате анализа проб выявлен широкий круг химических элементов, характеризующихся аномальными содержаниями в элювио-делювии. В условиях Крайнего Севера при соответствующем масштабе коренного оруденения выявляются яркие, высококонтрастные вторичные остаточные ореолы рассеяния, не уступающие ореолам, развитым в горных районах других ландшафтных зон СССР. Так, для золоторудных месторождений максимальные содержания элементов-индикаторов в ореолах рассеяния достигали (в %): свинца до 3,0; мышьяка до 2,0; цинка до 1,5; бария до 0,5; сурьмы до 0,3; ртути до  $3 \cdot 10^{-4}$  и т.д.; для оловорудных участков олова до 1,5; цинка до 0,5; бария до 1,0; свинца до 1,0, бора до 0,02 и т.д.

По графикам содержаний рудных элементов методом "трех уровней" [6] оценивалась величина местного коэффициента рассеяния  $\sigma$ , характеризующего миграционную способность (подвижность) элементов в зоне гипергенеза. Местное значение этого параметра для данного элемента в конкретном геохимическом ландшафте определялось как среднее арифметическое из серии независимых измерений с указанием доверительных интервалов оценки:  $\sigma = \bar{\sigma} \pm S/\sqrt{n}$ , где  $S$  - стандартное отклонение, определяемое с помощью табличного множителя  $\beta_n$  через размах найденных

значений  $R = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$  и  $n$  — число определений  $\sigma$  в пределах однородного участка. Сравнение средних значений  $\bar{\sigma}$  (в м) для каждого из основных рудных элементов по разным участкам по критерию Стьюдента показало значимость их различий, что позволило выявить обобщенный ряд гипергенной подвижности элементов в криолитозоне для золоторудных и оловорудных участков (в скобках — число определений  $n$ ).

Золоторудные участки:

Au (25) — Bi (8) — As (28) — Mn (12) — Ag (41) — Zn (11) — Cu (7)  
 $9,8 \pm 0,4$   $10,1 \pm 0,6$   $11,1 \pm 0,8$   $11,5 \pm 1,2$   $12,3 \pm 1,0$   $14,4 \pm 1,6$   $15,1 \pm 0,2$   
 Sn (11) — Pb (16) — Sb (4).  
 $15,8 \pm 0,8$   $18,0 \pm 0,8$   $19,1 \pm 1,2$

Оловорудные участки:

Bi (7) — As (14) — Ag (18) — Sn (24) — Zn (11) — Pb (18).  
 $10,4 \pm 1,1$   $12,1 \pm 0,7$   $12,7 \pm 0,6$   $12,9 \pm 0,3$   $15,1 \pm 0,8$   $16,3 \pm 0,3$

Важнейшим принципом количественной интерпретации вторичных остаточных ореолов рассеяния является существование пропорциональной зависимости между количеством металла в ореоле ( $M$ , м%;  $P$ , м<sup>2</sup>%) и количеством металла в коренном оруденении ( $M_p$ , м%;  $P_p$ , м<sup>2</sup>%), которую определяет коэффициент остаточной продуктивности  $k$  [5].

Этот показатель зависит от индивидуальных свойств рудных элементов и местных ландшафтно-геохимических условий и принимает значения  $k > 1,0$  (накопление элемента во вторичном ореоле рассеяния) или  $k < 1,0$  (вынос рудного элемента из зоны гипергенеза). Знание численных значений этого показателя необходимо: для более объективной оценки прогнозных ресурсов металлов в рудопоявлениях по их вторичным ореолам рассеяния, для введения поправок в геохимические показатели зональности  $\gamma$  при оценке уровня эрозийного среза коренного оруденения по количественным характеристикам вторичных ореолов или окисленных руд, для решения прямой задачи поисковой геохимии — расчета ожидаемого вида вторичного ореола рассеяния по заданным параметрам рудного тела и для решения многих других вопросов методики литохимических поисков.

Для определения  $k$  проводилось специальное литохимическое опробование с шагом 5–10 м по профилям вдоль разведочных канав на расстоянии 5–10 м от них по обоим или одному из бортов. Для конкретного геохимического ландшафта определялось среднее геометрическое значение  $k$  с указанием доверительных интервалов оценки:  $k \epsilon^{\pm 1}$ , где  $\epsilon$  — стандартный множитель, определяемый через размах с помощью табличного коэффициента  $\beta_n$  при  $n$  числе определений согласно выражению

$$\epsilon = \text{antlg} \left[ \beta_n / \sqrt{n} \lg(k_{\max} / k_{\min}) \right].$$

Значимость различий средних значений коэффициентов остаточной продуктивности для разных элементов в пределах одного участка или для нескольких участков с различными ландшафтно-геохимическими характерис-

тиками оценивалась с помощью критерия Стьюдента на 5%-ном доверительном уровне.

Для горно-таежных и горно-тундровых ландшафтов Северо-Востока СССР выявлено направленное, закономерное уменьшение средних значений коэффициента остаточной продуктивности  $k$  для основных рудных элементов (золота, серебра, олова, свинца) с уменьшением угла наклона местности  $\alpha$  увеличением мощности рыхлых образований  $h$  и увеличением доли мелкозема в разрезе элювио-делювия. Ландшафты крутых склонов характеризуются активной денудацией, в связи с чем рыхлый покров имеет здесь небольшую мощность ( $h = 0,8-1,5$  м). Элювио-делювий представлен обломочно-щебенистым материалом с незначительным количеством (5-15%) песчано-глинистой фракции, сезонно-талый слой до 1,5 м. Вынос мелкозема здесь со склонов происходит под влиянием поверхностных вод и интенсивной фильтрации талых вод на границе с многолетней мерзлотой. В условиях расчлененного рельефа ( $\alpha$  до  $30-40^\circ$ ) и активной денудации индивидуальные свойства химических элементов отступают на второй план благодаря активному сносу рыхлого материала со склонов и быстрому обновлению ореолов рассеяния, и для большей части рудных элементов средние значения  $k$  близки к 1,0. Ниже по склону ( $\alpha=15-25^\circ$ , СТС до 1,0 м, элювио-делювиальные образования представлены в значительной степени песчано-глинистым материалом с небольшим количеством щебенки, мощность рыхлых  $h$  достигает 2,0 м) за счет поступления "безрудного" мелкозема на поверхность рыхлых образований происходит разбавление рудного вещества во вторичных ореолах рассеяния, что приводит к уменьшению  $k$ . На выложенных участках подножий горных склонов ( $\alpha < 10^\circ$ , СТС до 0,5 м, в разрезе элювио-делювия преобладает глинистый материал с небольшим количеством песка, мощность рыхлых  $h=2,5$  м и более) вторичные остаточные ореолы рассеяния могут переходить в погребенное состояние ( $k \rightarrow 0$ ), и проведение здесь наземной литохимической съемки в обычном варианте без применения специальных методов анализа или обработки геохимических данных может оказаться неэффективным.

Ранжированный ряд элементов по убывающей величине  $\sigma$  коэффициентов остаточной продуктивности для горно-таежных и горно-тундровых ландшафтов имеет следующий вид (в скобках - число независимых определений):

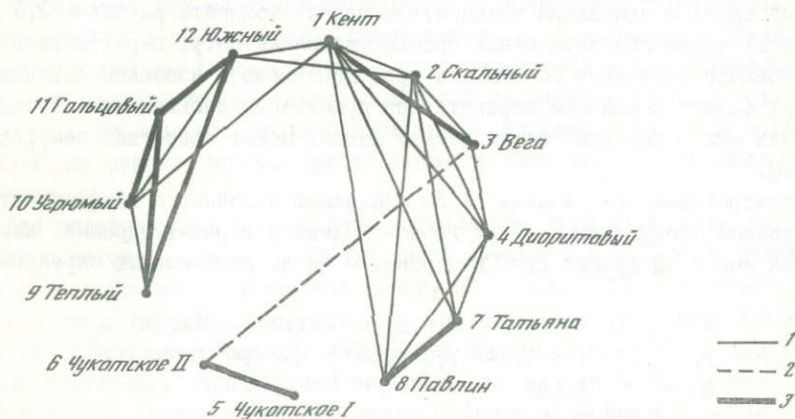
Vi(6) - Sn(14) - Au(12) - Pb(18) - As(12) - Ag(28) -  
2,1·1,3 $\pm$ 1 1,6·1,2 $\pm$ 1 1,4·1,3 $\pm$ 1 1,2·1,4 $\pm$ 1 0,9·1,1 $\pm$ 1 0,7·1,1 $\pm$ 1  
Cu(7) - Zn(6) - Sb(4).  
0,6·1,5 $\pm$ 1 0,4·1,4 $\pm$ 1 0,35·1,3 $\pm$ 1

Полученные данные свидетельствуют о перераспределении рудных элементов в процессе гипергенеза. Наряду с этим в результате исследования элементного состава, геохимических спектров и корреляционных зависимостей между содержаниями рудных элементов золоторудных и оловорудных месторождений и рудопроявлений Северо-Востока СССР от-

мечаются признаки геохимического сходства коренного оруденения и связанного с ним вторичного ореола рассеяния. Отыскание признаков сходства или различия между объектами проводилось путем корреляции их корреляционных матриц. В качестве признаков в данном случае использовались численные значения парных коэффициентов корреляции, полученные для сравниваемых объектов при одинаковом числе химических элементов типоморфного комплекса [6]. Мерой сходства или различия при этом служат направление и численные значения полученных коэффициентов корреляции.

Высокая степень сходства между корреляционными матрицами для содержаний рудных элементов во вторичных ореолах рассеяния и в коренном оруденении отмечена для участков Энтукчан ( $r = 0,87$ ), Угркмый ( $r = 0,84$ ), Гадакчан ( $r = 0,79$ ), Колумб ( $r = 0,77$ ), Кент ( $r = 0,76$ ) и др. Это позволяет по геохимическим характеристикам вторичных ореолов рассеяния классифицировать аномалии по принадлежности к определенным рудно-формационным типам коренного оруденения.

На рис. I показана корреляционная диаграмма для 12 золоторудных и золото-серебряных объектов, на которой отчетливо выделяется несколько групп, характеризующихся сходными корреляционными зависимостями во вторичных ореолах рассеяния между содержаниями рудных элементов. Первую группу образовали рудопоявления колымского рудного поля (Кент, Скальный, Вега, Диоритовый, объекты 1-4), которые проявляют некоторое сходство со вторичными ореолами рассеяния рудопоявлений Центрально-Колымского рудного района Татьяна и Павлин (объекты 7 и 8). Эти объекты, в свою очередь, характеризуются высокой степенью сходства ( $r_{7-8}=0,62$ ), образуя вторую группу. Третью группу сформировали вто-



Р и с. I. Корреляционная диаграмма золоторудных и золото-серебряных объектов

1, 2 - значимые связи: 1 - положительные, 2 - отрицательные; 3 - сильные положительные связи ( $r \geq 0,6$ );  $N_r = 45$ ;  $r_{5\%} = 0,29$

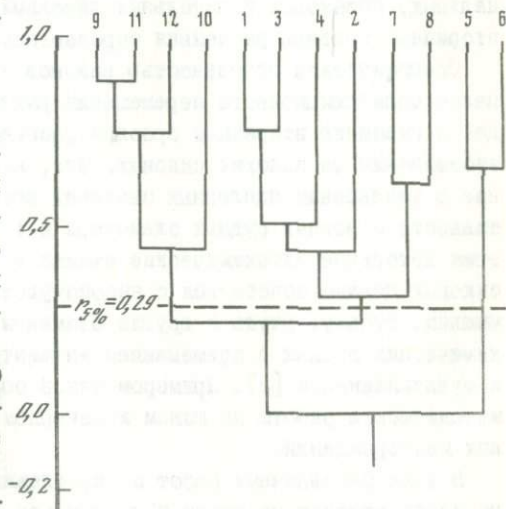
ричные ореолы рассеяния золото-серебряных участков Талый, Угримый, Вадунный и Южный (объекты 9-12). Высокая положительная корреляционная зависимость выявлена между матрицами вторичных ореолов рассеяния рудопоявлений Чукотское-I и Чукотское-II, с другими участками эти объекты значимых положительных связей не обнаруживают.

Весьма наглядно разделение объектов по группам осуществляется путем построения корреляционных дендрограмм [1]. На рис. 2 представлена дендрограмма, построенная на основе матрицы парных коэффициентов корреляции между корреляционными матрицами тех же 12 объектов. Дендрограмма строилась по методу группового объединения, основанного на

Р и с . 2. Корреляционная дендрограмма золоторудных и золото-серебряных объектов

Номера объектов см. на рис. 1)

усреднении парных коэффициентов корреляции, формирующих исходную матрицу. Первая стадия группировки заключалась в отыскании наиболее сходных объектов с последующим объединением их в единую группу. На второй стадии по значению меры расстояния между сходными группами находились две наиболее близкие, которые объединялись в одну. В качестве меры расстояния использо-



валось среднее арифметическое значение коэффициентов корреляции в каждой группе. На дендрограмме выделяются три группы, в которых отдельные подгруппы объектов объединяются на уровне значимых положительных значений коэффициентов корреляции ( $r_{5\%} = 0,29$ ). Первую группу составили вторичные ореолы рассеяния золото-серебряных объектов 9-12; во вторую группу вошли вторичные ореолы рассеяния рудопоявлений Колымского рудного поля (1-4), к которым на уровне  $r = 0,31$  подстраиваются объекты Центрально-Колымского района 7 и 8, и третья, наиболее обособленную группу сформировали вторичные ореолы рассеяния золоторудных месторождений Чукотки (5,6). Более подробно вопросы рудно-формационной принадлежности гипергенных геохимических аномалий рассмотрены в [2].

Накопленный опыт проведения поисковых и детальных литохимических съемок подтверждает, что в горно-таежных и горно-тундровых ландшафтах Северо-Востока СССР в результате геохимических поисков выявляются комплексные, высококонтрастные вторичные ореолы и потьки рассея-

ния рудных элементов. При прочих равных условиях крупным промышленным месторождениям отвечают более протяженные и богатые гипергенные аномалии золота, серебра, олова, мышьяка, свинца, цинка, сурьмы, ртути, висмута, молибдена, меди и других рудных элементов, что обеспечивает оценку прогнозных ресурсов металла по параметрам вторичных ореолов и потоков рассеяния. Основные параметры и геохимические характеристики вторичных ореолов рассеяния ( $C_{\text{max}}, \sigma, k$ ) в криолитозоне не отличаются от соответствующих показателей для других районов СССР. В связи с этим авторы решительно не согласны с утверждениями о малой эффективности литохимических съемок в криолитозоне в связи с ее специфическими ландшафтно-геохимическими особенностями. Практика региональных, поисковых и детальных литохимических съемок по потокам и вторичным ореолам рассеяния опровергает эту негативную оценку.

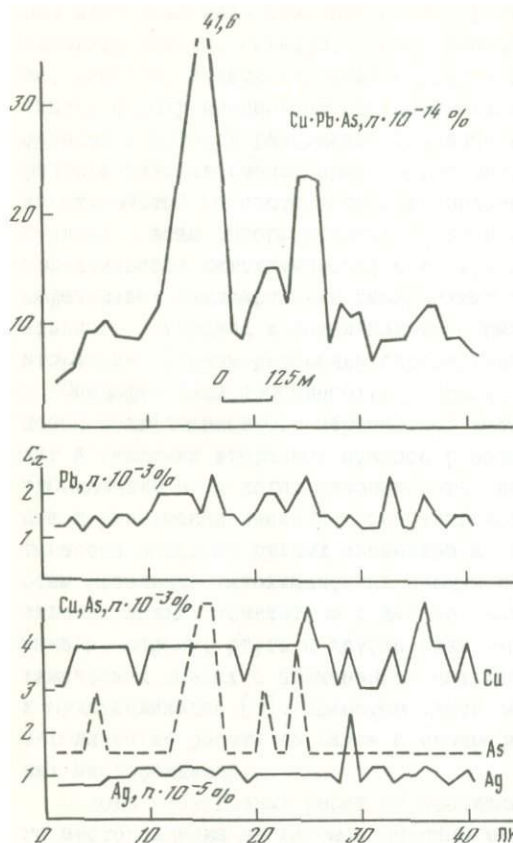
Специфической особенностью районов Крайнего Севера являются процессы солифлюкционного перемещения рыхлого материала, которые приводят к смещению вторичных ореолов рассеяния и к значительному их разубоживанию на пологих склонах. Это, как отмечалось, находит отражение в уменьшении численных значений коэффициентов остаточной продуктивности основных рудных элементов и элементов-спутников. В связи с этим детальные литохимические съемки в наземном варианте на пологих склонах должны сочетаться с высокочувствительным анализом проб на мышьяк, сурьму, ртуть и другие элементы и обработкой первичных геохимических данных с применением математических приемов осреднения и мультипликации [5]. Примером такой обработки могут служить опытно-методические работы на южном и северном флангах одного из золоторудных месторождений.

В ходе разведочных работ по прослеживанию Главной рудной жилы этого месторождения на южном и северном ее флангах было проведено литохимическое опробование по четырем профилям на предполагаемом продолжении рудной зоны. Профили проходились на площади, представленной заболоченной низиной с пологими склонами, на которых мощность делювиально-солифлюкционных образований достигала 10 м и более. Расстояние между смежными профилями составило 100 м, шаг отбора проб был принят 25 м.

В результате спектрального анализа проб явных геохимических аномалий на этих профилях выявлено не было, лишь в единичных пробах отмечено содержание основных рудных элементов, незначительно превышающие фон (рис.3). Коэффициент контрастности, который является критерием надежного выявления слабых геохимических аномалий [5], для основных рудных элементов по всем четырем профилям оказался меньше 3,0. Для усиления контрастности аномалий путем подавления "шума" и увеличения полезного сигнала были проведены осреднение первичных данных со скользящим окном в пять точек и мультипликация содержаний основных элементов-индикаторов золотого оруденения - мышьяка, свинца, сере-

Значения коэффициентов контрастности

Номер профиля	Мышьяк, 10 <sup>-3</sup> %			Свинец, 10 <sup>-3</sup> %			Серебро, 10 <sup>-5</sup> %			Медь, 10 <sup>-3</sup> %			As·Pb·Ag·Cu 10 <sup>-14</sup> (%) <sup>4</sup>		
	C <sub>ф</sub>	ε	γ	C <sub>ф</sub>	ε	γ	C <sub>ф</sub>	ε	γ	C <sub>ф</sub>	ε	γ	C <sub>ф</sub>	ε	γ
Южный-I	2,44	-	-	1,38	1,24	1,6	0,92	1,27	2,3	3,82	1,27	1,1	11,8	1,31	3,2
Южный-II	1,96	-	-	1,56	1,18	2,2	1,14	1,12	2,6	3,96	1,19	1,35	13,8	1,25	5,04
Северный-I	2,33	1,24	2,9	1,43	1,32	1,1	1,27	1,21	2,1	4,11	1,34	1,1	16,9	1,17	11,3
Северный-II	2,08	1,43	2,7	1,62	1,14	2,3	1,16	1,15	2,0	3,87	1,23	1,3	15,1	1,34	9,2



Р и с . 3. Графики содержа-  
ний рудных элементов и мульт-  
пликативного показателя по  
литохимическому профилю №  
II.

бра и меди. Значения коэффи-  
циентов контрастности сред-  
ненных и мультипликативных  
аномалий существенно возрос-  
ли и для всех четырех профи-  
лей превысили 3,0 (таблица).

Реальность выявленных ано-  
малий подтверждается совпа-  
дением их максимумов по сме-  
жным профилям на южном и се-  
верном флангах месторождения,  
а также геологическими дан-  
ными: в районе аномальных пи-  
кетов среди глин на мерзлот-  
ных медальонах наблюдается  
значительное количество об-  
ломков жильного кварца, кото-  
рый может быть связан с зо-  
ной оруденения. Совокупность  
геохимических и геологичес-  
ких данных позволила с вы-  
сокой степенью вероятности  
предположить о связи выявлен-

ных аномалий с продолжением рудной зоны к югу и северу от месторо-  
ждения, что в дальнейшем подтвердилось разведочными работами. В це-  
лом же следует отметить, что частичный переход остаточных ореолов  
рассеяния в погребенное состояние у подножий склонов не может по-  
влиять на эффективность среднемасштабных литохимических съемок, це-  
лью которых являются поиски промышленных месторождений, одновременно  
образующих ореолы рассеяния на различных интервалах нескольких гор-  
ных склонов и на водоразделах. Наземные литохимические съемки с це-  
лью выявления погребенных вторичных остаточных ореолов в коре выве-  
тривания или наложенных ореолов рассеяния целесообразно проводить  
при более детальном исследовании в пределах известных месторожде-  
ний и рудных полей.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Девис Дж. Статистика и анализ геологических данных. М.: Мир, 1977. 576 с.
2. Матвеев А.А., Николаев Ю.Н. Геохимическая характеристика золоторудных и золото-серебряных проявлений по их гипергенным аномалиям // Геохимические и геофизические методы поисков рудных месторождений на Северо-Востоке СССР. Магадан: СВКНИИ, 1985. С. 77-90.
3. Шерельман А.И. Геохимия ландшафта. М.: Высш. шк. 1975. 341 с.
4. Питулько В.М. Вторичные ореолы рассеяния в криолитозоне. Л.: Недра, 1977. 197 с.
5. Соловов А.П. Геохимические методы поисков месторождений полезных ископаемых: Учеб. для вузов. М.: Недра, 1985. 294 с.
6. Соловов А.П., Матвеев А.А. Геохимические методы поисков рудных месторождений: Учеб. пособие. 2-е изд. М.: Изд-во МГУ, 1985. 232 с.

УДК 550.84+550.85

В.А. Кононов

### ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ПОИСКИ РОССЫПЕЙ БЛИЖНЕГО СНОСА

Классическим методом поисков россыпей золота всегда являлось шликерное опробование аллювиальных отложений водотоков с последующей заверкой выявленных шликерных ореолов шурфами и буровыми скважинами. Шликерной съемкой покрыта практически вся территория известных золотосносных районов и по ее результатам открыт ряд россыпных объектов. Однако по мере отработки россыпей пополнение минерально-сырьевой базы действующих предприятий значительно замедлилось. Связано это в первую очередь с исчерпанием возможностей традиционных методов поисков россыпей золота.

Предпринимаются попытки выйти из создавшегося положения путем резкого увеличения объемов буровых работ и вовлечения в опробование бурением все новых и новых площадей. Все это вызывает резкое удорожание геологоразведочных работ при общем снижении их эффективности. Таким образом, назрела острая необходимость замены традиционных методов поисков россыпей новыми, позволяющими снизить затраты и повысить эффективность геологоразведочных работ.

Одним из таких методов для поисков россыпей ближнего сноса может стать геохимический метод поисков с опробованием аллювиальных отложений современных водотоков, т.е. поиски россыпей по потокам рассеяния. Основной формой нахождения золота в потоках рассеяния ландшафтов криолитозоны является его собственная минеральная форма. С этих позиций россыпь можно рассматривать как часть потока рассеяния золо-

та, возникшую при ряде благоприятных условий. К таким условиям можно отнести россыпеобразующий тип золоторудной формации коренных источников потоков рассеяния, их достаточный для формирования россыпи эрозивный срез, наличие в водотоке благоприятных гидродинамических условий для концентрирования частиц золота в толще аллювиальных отложений.

Использование геохимических методов уже на стадии региональных литохимических съемок по потокам рассеяния позволяет заниматься локальным прогнозированием россыпей в конкретных водотоках. Имея в руках карту с потоками рассеяния золота, исследователь фактически имеет карту расположения коренных источников этих потоков. Ему остается определить россыпеобразующие способности этих коренных источников, выяснить их эрозивный срез, провести анализ геологической и геоморфологической обстановки с точки зрения наличия благоприятных условий для формирования россыпей. Использование геохимических методов нами рассматривается в первую очередь для поисков россыпей ближнего сноса, т.е. россыпей в водотоках I и II порядка, редко III, где наблюдаются прямые связи между коренными источниками и сформированными в результате их разрушения россыпями. Именно в этих случаях россыпь может рассматриваться как частный случай потока рассеяния. Данные съемок по потокам рассеяния можно использовать для поисков русловых и террасовых россыпей, а погребенные в палеогидросети россыпи возможно выявлять с помощью литохимических поисков по их вторичным наложенным ореолам рассеяния [5].

Процесс прогнозирования россыпей на основании геохимических данных можно разбить на два этапа, или стадии: региональный и локальный. На первом этапе по результатам литохимической съемки по потокам рассеяния выделяются геохимические узлы и площади, перспективные на обнаружение россыпей; на втором этапе уже на основании исследований отдельных потоков рассеяния, использования данных по вторичным ореолам рассеяния проводится выделение конкретных водотоков или их участков, где могут быть обнаружены россыпи. На этом этапе намечаются места заложения буровых линий, определяются количественные параметры прогнозируемых россыпей.

Региональное прогнозирование. Итог этого этапа исследований аналогичен итогам традиционных методов поисков – выделению новых россыпных узлов. Основное различие подходов к решению этой задачи заключается в том, что в нашем случае исследователю известно пространственное положение практически 80–90% всех коренных источников россыпного узла и 100% всех наиболее крупных источников. Эти данные позволяют максимально локализовать заверочные работы, т.е. уменьшить их объемы и соответственно повысить эффективность. На основании установленных содержаний элементов в потоках рассеяния, их соотношений друг с другом, общей геологической ситуации представляется возможным

определить рудно-формационную принадлежность коренных источников и составить мнение об их россыпеобразующих способностях. Эти же данные позволяют определить уровень эрозионного среза коренных источников и соответственно оценить, достаточен ли был объем переработанного рудного материала для создания в водотоках концентраций россыпного золота.

Для исследованного района установлено, что наиболее перспективным на обнаружение россыпей являются площади геохимических узлов, коренные источники которых отнесены нами к золоторудным формациям плутоногенно-гидротермальной группы [6]. Поисковые данные заверочных работ подтвердили правильность этого прогноза. Кроме известных россыпных узлов, выделены малоисследованные узлы в плане поисков россыпей золота, геохимические узлы, коренные источники которых относятся к тем же россыпеобразующим золоторудным формациям. Соответственно площади этих геохимических узлов являются перспективными на поиски россыпей.

Второй основной задачей регионального прогнозирования является определение достаточности эрозионного среза коренных источников для формирования россыпей. Эта задача для исследованного региона решалась двумя способами: 1) на основании анализа геохимических показателей зональности, 2) использование геоморфологических критериев и имеющихся данных о вертикальном распространении россыпей золота в регионе.

Наиболее распространенными в настоящее время и подтвержденными большим фактическим материалом [4,6] являются представления о том, что золоторудные формации плутоногенно-гидротермальной группы формировались на глубинах 0,5–1,0 км. Факты о геологическом положении всех выявленных проявлений золота обеих групп золоторудных формаций, собранные нами по исследованному региону, свидетельствуют, что, несмотря на связь этих рудных формаций с разновозрастными интрузивными комплексами (ранне- и позднемиловым), вмещающие породы обычно однотипны и одновозрастны. Эти факты можно интерпретировать следующим образом. К моменту формирования золоторудных проявлений вулканогенно-плутоногенной группы срез территории составил 1,0–1,5 км. Эти цифры близки к приводимым в литературе [2,3] по сопредельным регионам. В результате золоторудные проявления обеих групп рудных формаций оказались на одной глубине по отношению к дневной поверхности и впоследствии одновременно были выведены на нее. Учитывая универсальность ряда зональности гидротермальных сульфидных месторождений [1], для выделенных нами групп рудных формаций можно предполагать близкие по составу ассоциации надрудных и подрудных элементов.

На основании данных проведенной литохимической съемки по потокам рассеяния было проанализировано гипсометрическое положение потоков рассеяния элементов рудного комплекса. Для каждого потока рассеяния

было определено положение точек R-точек окончания поступления рудного материала в водоток. Положение этих точек в известной мере характеризует гипсометрическое положение коренных источников потоков рассеяния. Для анализа использовались четыре интервала высот: 1100-900, 900-700, 700-500, 500-300 м, определены площади их распространения; все точки R были привязаны к этим интервалам. Суммарные продуктивности потоков рассеяния каждого элемента из группы рудных были подсчитаны отдельно для каждого интервала высот.

В табл. I приведены поинтервальные суммарные продуктивности потоков рассеяния золота, мышьяка, серебра, меди, цинка, свинца, молибдена и олова, а также отношения этих продуктивностей к площадям интервалов. Анализ табл. I свидетельствует, что максимальное количество потоков рассеяния каждого из рассмотренных элементов и их максимальные суммарные продуктивности отмечены для высот 600 м. Этот факт можно интерпретировать как свидетельство того, что именно эта высота характеризует среднерудный уровень золотого оруденения в целом, для которого характерны максимальное количество рудных тел и соответственно основные количества элементов рудного комплекса.

Кроме того, необходимо отметить, что для золота характерна максимальная удельная продуктивность потоков рассеяния для интервалов высот 500-300 м, причем она почти в 2 раза выше аналогичной цифры для интервала высот 700-500 м. Это свидетельствует о том, что в вертикальной колонке месторождений именно интервал 500-300 м является наиболее благоприятным для рудоотложения. К этому интервалу высот также приурочены и наиболее крупные россыпи.

На основании данных табл. I проведен подбор геохимических показателей, монотонно изменяющихся по высотам. Таких показателей выбрано семь (табл. 2).

Приведенные данные позволяют отметить в целом для всех источников закономерное уменьшение геохимических показателей, где в числителе - надрудные, в знаменателе - подрудные элементы. Таким образом, на основании приведенных данных вертикального размещения оруденения для исследованного региона можно отметить, что наиболее перспективными на обнаружение связанных с ними россыпей являются потоки рассеяния, гипсометрически располагающиеся ниже 600 м, так как именно ниже этой высоты выявлены коренные источники, характеризующиеся наибольшим эрозионным срезом и, значит, при их денудации в русла водотоков должно было поступить достаточное для образования россыпей количество рудного материала.

Вторым способом оценки степени эрозионного среза коренных источников, достаточного для образования россыпей, являлись геоморфологический анализ и использование данных о гипсометрическом интервале уже выявленных россыпей. На основании закономерностей геоморфологического положения известных россыпей из вновь обнаруженных потоков

рассеяния золота к перспективным отнесены только потоки, располагающиеся ниже максимальных высот распространения россыпей. Проведен анализ результатов буровых работ по ряду россыпных узлов (данные А.И.Толокольников), т.е. определены максимальные отметки плотика разведанных россыпей. Установлено следующее: россыпной узел I-760 м, россыпной узел 2 - 650 м, россыпной узел 3 - 870 м, россыпной узел 4 - 880 м, россыпной узел 5 - 680 м. Эти цифры необходимо использовать при разработке потоков рассеяния золота при прогнозировании как в пределах перечисленных россыпных узлов, так и на новых площадях, сходных с ними по геологическому, металлогеническому и геоморфологическому строению.

Т а б л и ц а I

Распределение продуктивностей потоков рассеяния элементов рудного комплекса по интервалам высот с учетом их площадей распространения

Абс. отм., м	S интерв., км <sup>2</sup>	n	P	P/S	n	P'	P'/S
			Золото		Мышьяк		
1100-900	2 760	10	207	0,08	4	$1,8 \cdot 10^5$	65,2
900-700	5 212	50	1170	0,23	20	$1,1 \cdot 10^6$	211
700-500	11 410	129	3040	0,27	28	$1,9 \cdot 10^6$	167
500-300	3 272	34	1360	0,42	4	$2,3 \cdot 10^5$	70,3
			Серебро		Медь		
1100-900	2 760	4	$1,2 \cdot 10^2$	0,04	3	$4,2 \cdot 10^4$	15,2
900-700	5 212	27	$1,4 \cdot 10^3$	0,27	37	$9,3 \cdot 10^5$	178
700-500	11 410	48	$2,9 \cdot 10^3$	0,25	87	$3,0 \cdot 10^6$	263
500-300	3 272	11	$8,9 \cdot 10^2$	0,27	13	$3,6 \cdot 10^5$	110
			Свинец		Цинк		
1100-900	2 760	4	$1,1 \cdot 10^4$	3,99	1	$1,4 \cdot 10^4$	5,1
900-700	5 212	26	$1,8 \cdot 10^5$	34,5	22	$9,0 \cdot 10^5$	173
700-500	11 410	61	$7,3 \cdot 10^5$	64	56	$4,6 \cdot 10^6$	403
500-300	3 272	12	$2,0 \cdot 10^5$	61,1	23	$7,7 \cdot 10^5$	235
			Молибден		Олово		
1100-900	2 760	2	$2,9 \cdot 10^2$	3,99	2	$2,3 \cdot 10^3$	0,83
900-700	5 212	23	$2,2 \cdot 10^4$	4,22	18	$1,4 \cdot 10^4$	2,69
700-500	11 410	57	$4,2 \cdot 10^4$	3,68	53	$6,9 \cdot 10^4$	6,1
500-300	3 272	18	$1,5 \cdot 10^4$	4,58	7	$7,2 \cdot 10^3$	2,2

Примечание. n - количество потоков рассеяния, использованных в подсчетах; P' - суммарная продуктивность потоков рассеяния, использованных в подсчетах; P'/S - удельная продуктивность на км<sup>2</sup>, продуктивность золота и серебра приведена в усл.ед.а продуктивность остальных элементов - в м<sup>2</sup>‰.

Т а б л и ц а 2

Значения геохимических показателей по потокам рассеяния  
для выбранных интервалов высот

Абс.отм., м	n	$\frac{As}{Mo}$	$\frac{As}{Sn}$	$\frac{As}{Au}$	$\frac{As}{Cu}$	$\frac{Ag}{Mo}$	$\frac{Au \cdot Ag}{Zn \cdot Pb}$	$\frac{Pb \cdot Zn}{Sn^2}$
1100-900	30	500	200	1300	4,3	0,4	$1,6 \cdot 10^{-4}$	29,1
900-700	223	48	70	950	1,2	0,06	$1,0 \cdot 10^{-5}$	689
700-500	519	43	29	430	0,63	0,07	$2,6 \cdot 10^{-6}$	705
500-300	122	0,6	1,4	14	0,63	0,08	$7,9 \cdot 10^{-6}$	2971
$R_{max} \sqrt{v_{min}}$		833	143	93	6,8	5,0	20,3	102

Локальное прогнозирование. Не вызывает сомнения, что не все потоки рассеяния золота обладают одной и той же перспективностью на россыпи, что связано, во-первых, с особенностями гидродинамического режима водотоков и их неотектонической историей развития, во-вторых, с особенностями коренных источников. Для более локальной разбраковки потоков рассеяния золота нами разработаны два локальных критерия.

Критерий динамической фазы развития водотока. Предложенные нами принципы прогнозирования россыпей относятся в первую очередь к водотокам низких порядков и основаны преимущественно на анализе геохимических данных по потокам рассеяния. Известно, что для водотоков низких порядков наиболее благоприятными для формирования россыпей являются инстративная и перстративная динамические фазы развития водотоков. Инстративная фаза - фаза врезания водотока, в которую формируется плотиковый аллювий, залегающий непосредственно на коренных породах. Для водотоков наиболее характерны одноканальные и прямолинейные русла, несортированный, грубообломочный аллювий. Для долин характерны крутые склоны с почти полным отсутствием растительности, с обилием скальных выходов, широким развитием курумов. Среди склоноформирующих процессов резко преобладают подповерхностный срыв и гравитационное сползание рыхлого материала, очень часто развиты осыпные и обвально-осыпные склоны. На отдельных участках русла ручьев бывают завалены неокатанным грубообломочным материалом. Русла водотоков часто не имеют четко выраженных элементов строения, не сформированы в полной мере. Преобладающим типом геохимических ландшафтов на склонах в этой динамической фазе является горно-тундровый, с нейтральным или слабкокислым окислительным классом миграции элементов. Чаще всего участки водотоков, находящиеся в инстративной фазе развития, приурочены к их верховьям. Однако необходимо отметить, что в отдельных случаях инстративная фаза отмечается и в средних, и даже в нижних частях бассейнов водотоков, что связано с активизацией неотектонических процессов. На таких участках водотоки текут в каньонообразных доли-

нах с обилием коренных выходов как в днище, так и в бортах русла. Склоны на таких участках долин становятся крутыми, на них развиты курумы, осыпи.

Перстративная фаза развития водотоков, фаза равновесия, характеризуется формированием равновесного аллювия, образующегося за счет длительного переувлажнения и сортировки плотикового аллювия. Для криолитозоны отмечается повсеместное присутствие в составе аллювия перстративных русел и мелкозема<sup>1</sup>, который обнаруживается во всех элементах русла, но его несколько больше в составе аллювия отмелей выпуклого борта. Для этой стадии характерны крупные горные реки с хорошо разработанными долинами, с развитыми элементами русла, заполненные аллювиальными отложениями, с однорукавными, извилистыми руслами. Отмечается частая асимметрия долин, вызванная процессами их расширения путем боковой абразии. На таких участках водотоков в составе руслового аллювия значительно возрастает количество мелкозема и неокатанного неотсортированного материала, поступающего с крутого подмывного склона. При симметричных долинах оба склона пологие, задернованные, покрытые моховой и кустарниковой растительностью. Основными склоноформирующими процессами на таких склонах являются дефляция, криогенный крип, солифлюкция. Геохимический тип ландшафтов – горно-тундровый с кислым глеевым классом миграции элементов. При асимметричных долинах один склон пологий, аналогичный описанному, а второй – крутой, часто с коренными выходами в подмывном борту и на самом склоне, с курумами и осыпным или обвально-осыпным характером рыхлого материала. На таких склонах склоноформирующие процессы – это подповерхностный срыв, гравитационное сползание. Геохимический тип ландшафтов – горно-тундровый с нейтральным или слабокислым окислительным классом миграции элементов. Перстративная фаза развития водотоков наблюдается в среднем и нижнем течении, но никогда не наблюдалась в верховьях.

Приведенные характеристики динамических фаз развития достаточно легко фиксируются в процессе выполнения геохимических поисков по потокам рассеяния и заверки на местности выявленных потоков и затем могут быть использованы при анализе данных.

Необходимо отметить, что для территорий с интенсивным проявлением ледниковой деятельности, в прошлом для верховий водотоков, очень часто характерно проявление констративной фазы развития, т.е. фазы аккумуляции рыхлого материала. Потоки рассеяния золота, выявляемые на таких участках долин, должны выделяться как неперспективные или мало-перспективные на обнаружение связанных с ними россыпей. Условий для концентрирования золота на таких участках нет, хотя и возможно формирование косовых россыпей, как правило не имеющих промышленного значения.

<sup>1</sup> Мелкозем – песчано-глинистый материал с размером частиц менее 1 мм.

Анализ результатов буровых работ на рекомендованных к разведке потоках рассеяния золота позволил установить, что, несмотря на одинаковую перспективность, с точки зрения описанных выше критериев лишь с частью потоков рассеяния были выявлены промышленные россыпи, в остальных случаях – лишь весовые или знаковые контуры. По нашему мнению, это связано в первую очередь с длительностью воздействия рудовых процессов на рыхлый материал, поступающий в русло. На основании полученных данных были установлены геохимические различия между потоками рассеяния этих двух групп. Были выбраны три геохимических показателя, по которым в наибольшей степени различаются потоки рассеяния; по отдельным водотокам, где фиксируются потоки рассеяния обеих групп, был проведен подсчет выбранных геохимических показателей. Результаты показаны в табл.3.

Т а б л и ц а 3

Величины геохимических показателей по потокам рассеяния

Номер участка опробования	Россыпи			Номер участка опробования	Без россыпей		
	Свинец золото	Мышьяк золото	Медь золото		Свинец золото	Мышьяк золото	Медь золото
1	$4 \cdot 10^1$	$6 \cdot 10^2$	$2,5 \cdot 10^2$	10	$2 \cdot 10^2$	$1,4 \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^2$
2	$3 \cdot 10^1$	$4 \cdot 10^2$	$2 \cdot 10^2$	11	$3 \cdot 10^2$	$5 \cdot 10^3$	$1,3 \cdot 10^3$
3	-	$1,7 \cdot 10^3$	$3 \cdot 10^2$	12	$5 \cdot 10^3$	$8 \cdot 10^4$	$1 \cdot 10^4$
4	-	$1 \cdot 10^3$	-	13	$5 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^3$	-
5	-	$1 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^2$	14	$7 \cdot 10^2$	$2,7 \cdot 10^3$	$3 \cdot 10^2$
6	-	$6 \cdot 10^2$	$1 \cdot 10^3$	15	$6 \cdot 10^2$	$2,5 \cdot 10^3$	$4 \cdot 10^2$
7	$2 \cdot 10^1$	$1,5 \cdot 10^3$	$2 \cdot 10^3$	16	$7 \cdot 10^2$	$1 \cdot 10^3$	$5,5 \cdot 10^2$
8	$7 \cdot 10^1$	$1 \cdot 10^3$	-	17	$4 \cdot 10^2$	$3,3 \cdot 10^3$	$4 \cdot 10^3$
9	$3 \cdot 10^1$	$8 \cdot 10^2$	$2 \cdot 10^3$	Среднее	$8,1 \cdot 10^2$	$5,3 \cdot 10^3$	$1,4 \cdot 10^3$
Среднее	$3,5 \cdot 10^1$	$8,7 \cdot 10^2$	$6,1 \cdot 10^2$	н	23,1	6,1	2,3

Анализ табл.3 позволяет отметить следующие особенности потоков рассеяния двух групп.

1. Значения геохимических показателей для "россыпных" потоков на порядок, а для первого показателя на два порядка меньше их значений для "нероссыпных" потоков рассеяния.

2. Для "россыпных" потоков отмечается отсутствие одного или нескольких элементов, для "нероссыпных" они, как обычно, присутствуют все.

Все геохимические показатели в целом характеризуют убывание содержания элементов-спутников в потоках рассеяния. Следует отметить, что, кроме приведенных водотоков, были выявлены россыпи и по другим водотокам; но подсчитать значения геохимических показателей по ним не

представляется возможным, так как, кроме основного компонента, в потоках рассеяния другие элементы не отмечались.

Выявленные закономерности в изменении величин геохимических показателей для двух групп потоков рассеяния можно объяснить неоднократным переувом аллювия в водотоках первой группы. Поэтому наиболее перспективными на обнаружение связанных с ними россыпей следует считать моноэлементные потоки рассеяния основного компонента.

На основании данных табл.3 нами был проведен расчет средних и граничных величин рассмотренных геохимических показателей.

Значения геохимических показателей для потоков рассеяния золота, с которыми связаны россыпи (1) и не связаны (2), приведены ниже:

Россыпь (1-9)	$3,5 \cdot 10^1$	$8,7 \cdot 10^2$	$6,1 \cdot 10^2$
Без россыпи (10-17)	$8,1 \cdot 10^2$	$5,3 \cdot 10^3$	$1,4 \cdot 10^3$
R	23,1	6,10	2,30
$v_{гр} = \sqrt{v_{I_{max}} - v_{2_{min}}}$	$1,2 \cdot 10^2$	$2,1 \cdot 10^3$	$7,7 \cdot 10^2$

Указанные граничные значения  $v_{гр}$  уменьшают возможность ошибок при интерпретации потоков рассеяния, Разрешающая сила геохимических показателей сравнительно мала, и ошибки не исключены, но применение трех геохимических показателей снижает вероятность ошибочного отнесения потока рассеяния к перспективному или неперспективному.

Описанные принципы разрабовки потоков рассеяния золота разработаны и опробованы в производственных условиях на примере нескольких россыпных объектов. Получены положительные результаты прогноза на флангах уже известных россыпных узлов, а также на новых малоизученных площадях, в пределах которых было выделено значительное число потоков рассеяния, перспективных на их соответствие промышленным россыпям. Около 60% из их числа было проверено поисковым бурением. В 85% случаев был достигнут положительный эффект, т.е. установлено наличие россыпей.

Таким образом, приведенные результаты использования геохимических методов поисков, в частности по потокам рассеяния для выявления россыпей ближнего сноса свидетельствуют о высокой эффективности предлагаемой методики.

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Барсуков В.Л., Григорян С.В. Овчинников Л.Н. Геохимические методы поисков рудных месторождений. М.: Наука, 1981. 321 с.
2. Геологические критерии поисков россыпей /Под ред. Л.З.Быховского. М.: Недра, 1981. 254 с.
3. Желнин С.Г. Условия образования аллювиальных россыпей золота на северо-востоке Азии. М.: Наука, 1979. 120 с.

4. Петровская Н.Б. Самородное золото. М.: Наука, 1973. 345 с.
5. Питулько В.М. Вторичные ореолы рассеяния в криолитозоне. Л.: Недра, 1977. 197 с.
6. Шило Н.А. Основы учения о россыпях. М.: Наука, 1981. 383 с.

## Содержание

Введение .....	3
Соловов А.П., Матвеев А.А., Миялев С.А., Чепкасова Т.В.	
Оценка прогнозных ресурсов на основе принципа подобия.....	5
Перельман А.И., Борисенко Е.Н. Геохимия глеевых процессов.	19
Квятковский Е.М. Способы оценки мировых прогнозных ресурсов.....	29
Григорян С.В. Зональность первичных геохимических ореолов — основа оценки рудопоявлений.....	37
Свешников Г.Б. О перспективах развития дистанционных атмохимических методов поисков месторождений полезных ископаемых.....	42
Фурсов В.З. Характер ртутных ореолов рудных месторождений.	47
Озерова Н.А., Машьянов Н.Р. Новое в ртутметрии.....	69
Рыс Ю.С. Геохимические методы разведки, основанные на геоэлектрических явлениях.....	81
Гольдберг И.С. Электрохимический механизм извлечения элементов из горных пород.....	88
Росман Г.И. К вопросу о научно-техническом прогрессе в применении литохимических методов при прогнозировании и поисках слабопроявленных гидротермальных рудных месторождений.....	97
Юфа Б.Я. Метрологические аспекты современной поисковой геохимии .....	105
Бугров В.А. Развитие идей А.П. Соловова по количественной интерпретации геохимических аномалий .....	113
Чепкасова Т.В. Прогнозная оценка и зональность Саурейского полиметаллического месторождения.....	118
Баумштейн В.И. К методике изучения эндогенных геохимических полей полиформационного оруденения.....	127
Новиков Ю.А., Новикова Л.Н. Выявление погребенных карбо- натитовых месторождений по вторичным ореолам рассеяния.....	135
Виноградова Н.А. К вопросу об интерпретации результатов геохимического опробования курумных образований.....	140
Шваров Ю.В. Интерпретация литохимических потоков рассеяния при различающихся скоростях миграции рудных компонентов.....	143

Марченко А.Г. Математические модели литохимических потоков рассеяния как основа их количественной интерпретации.....	150
Бородин В.П., Бровчук И.Ф., Астафьев В.Н. Обобщение поисковых геохимических данных при литохимических съемках по потокам рассеяния.....	160
Трофимов Н.Н., Рычков А.И., Потоя Г.Г., Маркелова Б.А. Значение высокоподвижных элементов для увеличения эффективности литохимических поисков скрытого оруденения.....	165
Алексеев С.Г., Духанин А.С., Диффузионное извлечение подвижных форм нахождения металлов для поисков скрытого оруденения.....	174
Шестаков Ю.Г., Леонтьев С.И. Алгоритм переоценки старых золоторудных полей по геохимическим данным.....	178
Степанов И.И. Способ оценки качества анализа.....	184
Матвеев А.А., Николаев Ю.Н. Вторичные ореолы рассеяния рудных месторождений Северо-Востока СССР.....	188
Кононов В.А. Геохимические поиски россыпей ближнего сноса.	197

Научное издание

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ  
И НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ПРОГРЕСС  
В ГЕОЛОГИЧЕСКОМ ИЗУЧЕНИИ НЕДР

Утверждено к печати Межведомственным советом по проблеме "Научные основы геохимических методов поисков месторождений полезных ископаемых"

Художественный редактор В.В.Алексеев  
Технический редактор Н.В.Вишнева

ИБ № 39932

Подписано к печати 19.06.89 .Т - 09885  
Формат 60х90/16. Бумага офсетная № 1. Печать офсетная  
Усл. печ. л. 13,0. Усл. кр.-отт. 13,3. Уч.-изд. л. 14,4  
Тираж 650 экз. Тип. зак. 1658. Цена 2р.90к.

Ордена Трудового Красного Знамени издательство "Наука"  
117864 ГСП-7, Москва В-485, Профсоюзная ул., д. 90

Ордена Трудового Красного Знамени 1-я типография издательства "Наука"  
199034, Ленинград В-34, 9-я линия, 12

2р. 90 к.

5148