

**ВЫЯВЛЕНИЕ
ЛИТОГЕОХИМИЧЕСКИХ
АНОМАЛИЙ
РЕНТГЕНРАДИОМЕТРИЧЕСКИМ
МЕТОДОМ**

МОСКВА-1978

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

МИНИСТЕРСТВО ГЕОЛОГИИ СССР

ИНСТИТУТ МИНЕРАЛОГИИ, ГЕОХИМИИ И КРИСТАЛЛОХИМИИ РЕДКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

**ВЫЯВЛЕНИЕ
ЛИТОГЕОХИМИЧЕСКИХ
АНОМАЛИЙ
РЕНТГЕНРАДИОМЕТРИЧЕСКИМ
МЕТОДОМ**

(Методические рекомендации)



МОСКВА-1978



Составители:

Е.И.ЗАЙЦЕВ,
В.И.МИЛЬЧАКОВ,
Л.С.СОКОЛОВ



ИНСТИТУТ МИНЕРАЛОГИИ, ГЕОХИМИИ
И КРИСТАЛЛОХИМИИ РЕДКИХ ЭЛЕМЕНТОВ (ИМГРЭ), 1978

Геохимические методы поисков являются одним из наиболее эффективных средств выявления скрытых (не выходящих на поверхность) месторождений полезных ископаемых. Эти методы, как известно, основаны на выявлении и изучении первичных и вторичных геохимических ореолов путем опробования зоны рудовмещающих пород или рыхлых отложений, образовавшихся при гипергенном разрушении месторождения [3,6].

Основным способом выявления геохимических ореолов по элементам-индикаторам оруденения в настоящее время является приближенно-количественный спектральный анализ отобранных проб, который проводится в крупных стационарных лабораториях. Удаленность аналитической базы от места проведения поисковых работ приводит к большому разрыву во времени между отбором проб и получением результатов анализа, что практически исключает возможность оперативного управления ходом поисковых работ. Поэтому одним из путей повышения эффективности геохимических поисков является разработка экспрессных методов выявления геохимических аномалий в полевых условиях.

Весьма перспективным в этом отношении является рентгенорадиометрический РР-метод, основанный на возбуждении атомов анализируемых элементов первичным излучением радиоизотопа и регистрации рентгеновского излучения возбужденных атомов с помощью специальной спектрометрической аппаратуры.

Как показали проведенные в ИМГРЭ исследования [9-12, 19], с помощью РР-аппаратуры возможно выявление аддитивных ореолов $\sum Z_n$, Рb, As с чувствительностью $2 + 4 \cdot 10^{-3}\%$ путем опробования пород в естественном залегании или экспресс-анализа отобранных проб рыхлых образований. Возможно определение и ряда других элементов-индикаторов.

Появившиеся в последнее время публикации [2, 7, 8, 20, 25] свидетельствуют о значительном интересе различных геологических организаций к практическому использованию РР-метода при геохимических исследованиях. С целью облегчить эту задачу и составлены настоящие методические рекомендации. В них авторы попытались обобщить основные результаты методических исследований и практического применения РР-метода при геохимических поисках, полученные в лаборатории ядерно-физических методов ИМГРЭ за последние годы.

Накопленный опыт пока невелик, многие вопросы требуют дальнейшего развития, поэтому рекомендации не претендуют на полноту и закон-

ченность; они будут перерабатываться по мере накопления новых данных. Авторы с благодарностью примут все замечания и пожелания по существу и форме изложения и постараются их учесть в дальнейшем.

Глава I. ВЫЯВЛЕНИЕ АНОМАЛИЙ СУММЫ Zn , Pb , As И ДРУГИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Геологической предпосылкой использования суммарного содержания цинка, свинца и мышьяка ($\sum Zn, Pb, As$) для выявления геохимических ореолов служит то обстоятельство, что указанные элементы являются характерными индикаторами полиметаллического, золото-сульфидного и ряда других типов оруденения и формируют широкие геохимические ореолы над рудными телами [5, 21].

Физической предпосылкой успешного применения рентгенометрического (РР) метода явилась возможность выделения и одновременной регистрации K -излучения цинка, мышьяка и L -излучения свинца, возбуждаемых фотонным излучением радиоизотопа.

Такие измерения позволяют существенно повысить чувствительность опробования и надежность выявления геохимических аномалий по сравнению с РР-анализом на любой из указанных элементов.

Однако обеспечение высокой чувствительности, точности и производительности РР-опробования возможно лишь при выполнении ряда условий, а именно, при надлежащем выборе а) типа и активности возбуждающего источника; б) геометрии измерения; в) типа детектора и электрического режима его работы; г) энергетических зон регистрации (положение и ширина окон амплитудных дискриминаторов); д) способов учета вариаций состава опробуемых пород, и влияния мешающих элементов; е) способа учета влияния фона в аналитических областях спектра; ж) способа расчета содержания определяемых элементов. Кроме того, требуют рассмотрения и учета такие факторы, как нестабильность работы аппаратуры, влажность опробуемого материала, крупность частиц, неровность опробуемой поверхности и т.п. Ниже эти вопросы рассмотрены более подробно.

Условия измерений и аппаратура

При РР-анализе на суммарное содержание цинка, свинца и

мышьяка очевидной является необходимость использования в качестве аналитических линий К-серии цинка и мышьяка и L-серии свинца.

С учетом того, что энергетическое разрешение пропорциональных счетчиков (ПС) в этой области энергий составляет 12-20%, при измерении суммарной интенсивности этих линий в канал регистрации излучения возможен вклад и некоторых других элементов, основные из которых приведены в табл. I. Для полиметаллических, золото-сульфидных и ряда других типов месторождений такие элементы, как Co , Ni , Rb , Y , Ta , W , имеют содержания на порядок ниже $\sum Zn$, Pb , As . Элементы от Re до Po (кроме Pb) имеют содержания еще ниже - на два порядка и более. То же самое относится к Ga , Ge , Se , Br , Kr . Содержание меди в ряде случаев может быть сравнимо с содержаниями цинка и свинца. С геохимической точки зрения это является благоприятным, так как повышенное содержание меди, как и других отмеченных элементов (за исключением Rb и Y), способствует более надежному выявлению ореолов.

Из приведенных в табл. I элементов реально мешающими являются Fe и Sr , содержания которых в зависимости от типа пород могут достигать до 5-30% и 0,01-0,5% соответственно. В отличие от большинства перечисленных, эти элементы, как правило, не являются индикаторами указанных типов оруденения, поэтому вклад их характеристического излучения в канал регистрации $\sum Zn$, Pb , As должен быть специально учтен.

Выбор радиоизотопного источника в общем случае определяется физическими аспектами анализа, атомными номерами анализируемых элементов и условиями, в которых проводят измерения.

В табл. 2 приведены характеристики некоторых радиоизотопов, которые могут быть использованы при определении \sum (здесь и в дальнейшем вместо слов "суммарное содержание цинка, свинца и мышьяка" используется символ \sum).

Наибольшую эффективность возбуждения характеристического излучения К-серий цинка и мышьяка и L-серии свинца обеспечивают ^{238}Pu , ^{241}Am и ^{93}Mo . Рассеянное излучение изотопа ^{238}Pu может давать заметный вклад (в зависимости от энергетического разрешения счетчиков) в канал регистрации аналитических линий, приводя тем самым к снижению контрастности и предела обнаружения определяемых элементов. Исходя из характеристик, приведенных в табл. 2, можно предположить, что наиболее подходящим источником является ^{93}Mo . Однако в настоящее время этот источник, как и ^{241}Am с вы-

ходом L-линий, серийно не выпускается.

Поэтому целесообразно использование источников на основе изотопов ^{109}Cd и $^{119\text{m}}\text{Sn}$, обеспечивающих высокую эффективность возбуждения и контрастность аналитических линий.

Для регистрации рентгеновского излучения в области 6-13 кэВ более пригодны пропорциональные счетчики по сравнению со сцинтилляционными, так как они имеют более высокое энергетическое разрешение.

При определении Σ наиболее предпочтительно использование счетчиков с аргоновым наполнением, типа СРМ-16, обладающих большой эффективностью регистрации и относительно низким уровнем фона [14]. Если активность возбуждающего источника недостаточна (интегральный поток регистрируемых квантов от образца меньше $1 + 2 \cdot 10^3$ квант/сек), целесообразно использование счетчиков с ксеноновым наполнением типа СРМ-15.

В табл.3 приведены основные типы серийно выпускаемых ИС [18], которые могут быть использованы в аппаратуре для определения Σ .

Возбуждение и регистрация характеристического излучения определяемых элементов осуществляется с помощью блоков детектирования. Выпускаемая промышленностью РР-аппаратура имеет в своем составе блоки детектирования, в основном предназначенные для определения рудных содержаний элементов. Для достижения минимального предела обнаружения в конструкции блока детектирования необходимо а) обеспечить минимальный вклад рассеянного излучения от элементов конструкции блока; б) создать поток вторичного излучения такой величины, чтобы обеспечить оптимальную загрузку счетчика и последующего спектрометрического тракта; в) выбор материалов конструкции блока осуществить таким образом, чтобы характеристическое излучение входящих в них элементов не попадало в рабочие каналы регистрации.

С учетом этих требований некоторые типы промышленных блоков детектирования можно с минимальными изменениями подготовить для определения низких содержаний элементов. Например, в переносном блоке детектирования аппаратуры "Гагара" (РПС4-01) детали крепления источника излучения содержат заметные количества меди и цинка, излучение которых создает дополнительный фон. Защита из тонкой кадмиевой фольги, нанесенная на поверхность этих деталей, полностью устраняет мешающее излучение. Кроме того, уменьшение внутреннего диаметра крышки кольца, удерживающего лавсановую пленку

Характеристическое излучение элементов в диапазоне энергий 6-13 кэВ

Таблица 1

Элемент	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	Rb	Sr	Y	-	
Энергия К-серии	6,4-7,0	6,9-7,6	7,5-8,3	8,0-8,9	8,6-9,6	9,2-10,3	9,8-11	10,5-11,7	11,2-12,5	11,9-13,3	12,6-14,1	13,4-15,0	14,2-15,9	14,9-16,9	-	
Элемент	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po
Энергия К-серии	7,2-8,1	7,4-8,4	7,6-8,7	7,9-9,0	8,1-9,3	8,4-9,7	8,6-10	8,9-10,3	9,2-10,7	9,4-11,1	9,7-11,4	10-11,8	10,2-12,2	10,5-12,6	10,8-13	11,1-13,4

Таблица 2

Основные характеристики радиоизотопов

Изотоп	Период полураспада	Тип распада	Энергия β- и рентгеновского излучения, кэВ (выход, %)
⁹³ Mo	2600 лет	Э.З. (100%)	17 К-излучение Nb
¹⁰⁹ Cd	470 дней	Э.З. (100%)	22,6 К-излучение Ag 88,4(4%) - γ
^{119m} Sr	250 дней	И.П.	25 К-излучение Sr 24 (Слабая) - δ 65 (1%) - δ
²³⁸ Pu	86 лет	α-распад	UL-излучение 43,5 (28%)
²⁴¹ Am	458 лет	α-распад	Np L-излучение (20,9) 26(3%) - γ 60(40%) - δ

Примечание: Э.З. - электронный захват;
И.П. - изомерный переход

Параметры пропорциональных счетчиков для РР-анализа

Таблица 3

Тип счетчиков	Газовое наполнение	Диапазон рабочего напряжения, В	Эффективность регистрации, кэВ-%	Амплитудное разрешение, кэВ-%	Входные окна			Материал катода	Габариты, мм
					материал	толщина, мм	размеры, мм		
СРМ-16	90% Ar 10% CH ₄	1700-2100	6,4-70 15-14	6,4-18	Бериллий	30мг/см ²	50 x 20	Алюминий	ø55x242
СРМ-15	90% Xe 10% CH ₄	2000-2500	6,4-90 22,2-38	6,4-20	"	"	"	"	"
СН-6Р	90% Xe 10% C ₂ H ₂	1800-2000	6,4-85 30-39	6,4-20	"	35мг/см ²	3,5см ²	"	ø35 x 180
СРНО-12	Ar, Xe 10% CH ₄	1000-2200	8-90	8-17	"	150	10 x 45	Нержавеющая сталь	ø35 x 160
СРНО-14	"	"	"	"	"	"	10 x 26	"	ø35 x 122
СРНО-17	90% Xe 10% CH ₄	1800-2200	6-90	8-20	"	150	20 x 10	"	ø24 x 140
СРНО-18	"	"	"	"	"	"	12 x 42	"	ø35 x 200

перед входным окном счетчика, позволяет заметно снизить интенсивность рассеянного первичного излучения.

В лабораторном блоке детектирования аппаратуры "Тагара" также необходима кадмиевая защита. Необходимое увеличение потока вторичного излучения от пробы может быть достигнуто за счет уменьшения расстояния проба - счетчик. Дополнительный кадмиевый коллиматор перед входным окном счетчика позволяет заметно снизить мешающее рассеянное излучение.

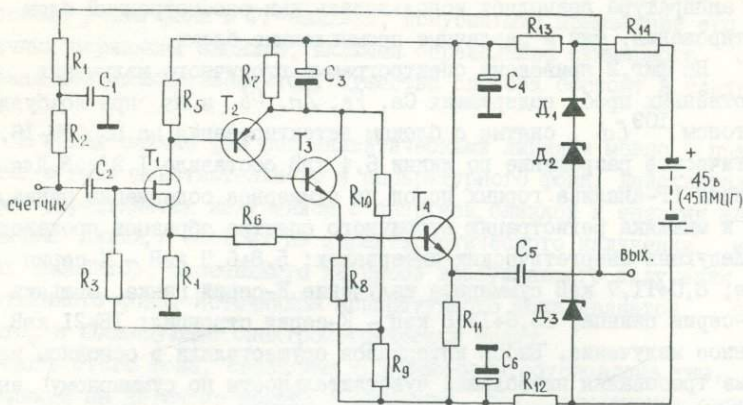
В целом, такого рода модернизация позволяет в 2-3 раза снизить предел обнаружения по Σ и обеспечить его величину на уровне 0,008-0,01%.

Более низкий предел обнаружения достигается с использованием разработанных в ИМГРЭ блоков детектирования на ПС СРМ-16 и источниках ^{109}Cd или $^{119\text{m}}\text{Sn}$, и предназначенных для работы в полевой лаборатории и измерений в условиях естественного залегания горных пород (переносной блок). За основу была принята боковая геометрия с измерением в широком телесном угле [18]. Оба варианта конструкций идентичны, за исключением узлов держателя источников и облучения образцов. Эти узлы выполнены в виде отдельных приставок, поэтому один и тот же блок может использоваться с соответствующей приставкой как для измерения проб, так и поверхностей горных пород. Более подробное описание блоков приведено в разделе об опробовании пород в их естественном залегании.

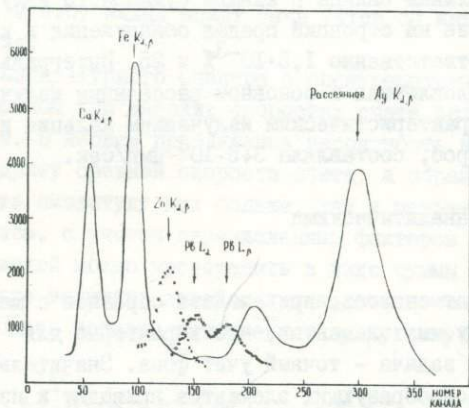
Электрическая схема РР-анализатора состоит из предварительного усилителя, основного усилителя, амплитудного анализатора, блоков регистрации и вывода информации, а также источников низковольтного и высоковольтного питания.

В рассмотренном блоке детектирования на счетчике СРМ-16 нами использован предварительный усилитель (фиг.1), имеющий на входе полевой транзистор [22]. Это позволило снизить уровень собственных шумов аппаратуры и работать при пониженном напряжении на счетчике. Кроме того, наличие такого предусилителя дает возможность использовать блок детектирования в сочетании с различной промышленной РР-аппаратурой ("Тагара", БРА-6, "Квант" и др.).

Следует отметить, что при необходимости вместо промышленного РР-анализатора может быть использован набор серийно выпускаемых блоков, реализующих электрическую схему анализатора. Например, при работе в полевой лаборатории хорошо зарекомендовали себя спектрометрический усилитель СЭС-2-03 в сочетании с многоканальным



Фиг. 1. Принципиальная схема предусилителя для пропорциональных счетчиков



Фиг. 2. Спектрограмма вторичного излучения искусственных проб, содержащих Ca 20%, Fe 5, Zn 0,5, Pb 0,5, Sr 0,5%

анализатором АИ-128 (или LP-4840) и высоковольтным блоком ВС-22. Эта аппаратура позволяет использовать как рассмотренный блок детектирования, так и различные промышленные блоки.

На фиг.2 приведены спектрограммы вторичного излучения искусственных проб, содержащих Са, Fe, Zn, Pb и As при возбуждении изотопом ^{109}Cd , снятые с блоком детектирования на ПС СРМ-16. Энергетическое разрешение по линии 6,4 кэВ составило 1,2 кэВ. Для проведения РР-анализа горных пород на суммарное содержание цинка, свинца и мышьяка регистрацию вторичного спектра образцов производили в следующих энергетических интервалах: 5,8+6,9 кэВ - К-серия железа; 8,0+11,7 кэВ суммарное излучение К-серий цинка, мышьяка и L-серии свинца; 13,6+14,6 кэВ - К-серия стронция; 18+21 кэВ рассеянное излучение. Выбор интервалов осуществляли в основном исходя из требования наибольшей чувствительности по суммарному аналитическому излучению и минимального влияния мешающих линий [15, 16].

Статистический предел обнаружения, определяемый утроенной величиной среднеквадратической погрешности измерения фона, составил около 0,003% Σ при времени измерения 1 мин. Контрастность аналитической линии свинца в канале суммарного излучения около 9,6. При анализе на стронций предел обнаружения и контрастность составляли соответственно $1,5 \cdot 10^{-3}\%$ и 25. Интегральная импульсная нагрузка, обусловленная в основном рассеянным излучением источника, а также характеристическим излучением кальция и железа, входящих в состав проб, составляла $3+5 \cdot 10^3$ имп/сек.

Учет фона под аналитическими линиями

Как уже отмечалось, при анализе образцов с малыми содержаниями анализируемых элементов, что характерно для геохимических проб, основная задача - точный учет фона. Значительные вариации содержания порообразующих элементов приводят к изменениям эффективного атомного номера пород и, как следствие, к изменениям вариации интенсивности рассеянного на пробе излучения. При этом фон может изменяться на 100% и более. Дополнительные вариации фона в аналитической области возникают при изменении интенсивности мешающих элементов - железа и стронция.

Известные способы учета фона [4] не обеспечивают в этом слу-

чае необходимой экспрессности или точности анализа или нуждаются в применении специальной аппаратуры. Поэтому нами разработан новый способ учета фона в РР-анализе, допускающий применение его в различных вариантах анализа, включая определение суммарного содержания нескольких элементов. Существо способа состоит в следующем.

В общем случае фон под аналитическими линиями можно представить в виде действительного и аппаратного фона. Действительный фон определяется излучением с энергией, близкой к энергии аналитических линий, и состоит из характеристического излучения мешающих элементов, рассеянного на пробе возбуждающего излучения и естественного фона. Источником аппаратного фона является сам детектор и последующий спектрометрический тракт.

Часть этого фона, связанная с детектором, обусловлена тем, что при падении на детектор кванта с энергией E_{γ} существует определенная вероятность образования импульса с амплитудой в интервале от 0 до $\approx E_{\gamma}$, и скорость счета фона линейно связана с падающим потоком излучения. Поэтому даже в условиях полного энергетического разрешения каждая линия падающего на детектор излучения дает свой вклад в область аппаратного пика другой линии, имеющей меньшую энергию, и этот вклад может быть учтен по интенсивности вызывающей его линии.

Искажение аппаратного спектра в спектрометрическом тракте происходит в основном при высоких скоростях счета вследствие наложения импульсов. В первом приближении вероятность наложений пропорциональна квадрату средней скорости счета, а образующиеся импульсы могут иметь амплитуду как больше, так и меньше средней.

Таким образом, с учетом перечисленных факторов фон под j -аналитической линией можно представить в виде суммы постоянного слагаемого, а также величин, линейно и квадратично связанных с интенсивностями пиков полного поглощения, присутствующих в аппаратном спектре:

$$N_{j\phi} = \alpha_j + \sum_{i=1}^n N_i (\alpha_{ji} + t_{ji} N_i), \quad i=1,2,\dots,n, \quad (1)$$

где n - число пиков полного поглощения в спектре, включая пики некогерентно и когерентно рассеянного излучения; N_i - счет в i пике полного поглощения; α_i - постоянная составляющая фона под j -ой линией; α_{ji} - вклад i -ой линии в фон под линией j ; t_{ji} - вклад i -ой линии в фон под линией j вследствие эффекта нало-

жения импульсов. Число слагаемых в формуле (1) может быть меньше N при условии достаточного разрешения и сравнительно невысоких импульсных нагрузок. В этом случае суммирование ведется по пикам, имеющим амплитуду больше анализируемого. Таким образом, фон под аналитической линией каждого из определяемых элементов находят по измеренным интенсивностям пиков остальных определяемых элементов, присутствующих в пробе, линиям мешающих элементов и рассеянного первичного излучения. Предварительно на фоновых пробах, содержащих по одному из определяемых и мешающих элементов, а также на фоновых пробах, состоящих только из наполнителей (с различным эффективным атомным номером) измеряют фоновые вклады (постоянные коэффициенты в формуле (1), равные отношениям скоростей счета на местах аналитических линий определяемых элементов к скорости счета в пиках аналитических линий других определяемых и мешающих элементов и линий рассеянного излучения при, по крайней мере, двух различных импульсных нагрузках по этим линиям.

Описанный способ учета фона в течение ряда лет проходил широкую экспериментальную апробацию при РР-анализе различных по составу объектов при измерениях как с пропорциональными счетчиками, так и с полупроводниковыми детекторами, которая показала его высокую точность и эффективность применения [11, 12].

Рассмотрим подробнее практические реализации методики учета фона на примере анализа геохимических проб. Используя формулу (1), а также считая, что мешающими элементами являются железо и стронций, можно записать выражение для фона в канале регистрации Σ

$$N_{\Sigma\phi} = \alpha_{\Sigma} + \sum_i N_i (\alpha_{\Sigma i} + t_{\Sigma i} \dots N_i), \quad (2)$$

где условно $i = Fe, Sr, S$ (S обозначает рассеянное излучение). Многократные измерения показали, что в среднем состав геохимических проб позволяет пренебречь эффектами наложения импульсов при регистрации линий рассеянного излучения и линии стронция, но при содержании железа свыше 15% наложение импульсов по линии железа следует учитывать. Полагая в формуле (2)

$$t_{\Sigma Sr} = 0, \quad t_{\Sigma S} = 0,$$

запишем ее в развернутом виде

$$N_{\Sigma\phi} = (\alpha_{\Sigma} + \alpha_{\Sigma S} N_S) + \alpha_{\Sigma Sr} N_{Sr} + (\alpha_{\Sigma Fe} + t_{\Sigma Fe} N_{Fe}) N_{Fe}. \quad (3)$$

Коэффициенты первого слагаемого (в круглых скобках) формулы (3) определялись по зависимости, полученной при измерении проб с различным $L_{\text{эфф}}$. На фиг.3 видно, что эта зависимость в широком диапазоне изменения $L_{\text{эфф}}$ является линейной. Практически для определения α_{Σ} и $\alpha_{\Sigma S}$ измеряли только два стандарта - SiO_2 и CaO , и величины этих коэффициентов находили решением системы двух уравнений с двумя неизвестными.

Вклад излучения стронция в канал измерения Σ определяли из соотношения

$$\alpha_{\Sigma Sr} = \frac{N_{\Sigma} - N_{\Sigma S}}{N_{Sr} - N_{Sr S}}, \quad (4)$$

где $N_{\Sigma S} = \alpha_{\Sigma} + \alpha_{\Sigma S} N_S$; N_{Sr} - измеренная величина счета в канале стронция; $N_{Sr S}$ - фон в канале стронция, связанный с рассеянным первичным излучением; N_{Σ} - измеренный счет в канале Σ ; при этом величины, входящие в (4), определяли при измерении стандарта с содержанием 0,5% Sr . Коэффициенты α_{Σ} и $\alpha_{\Sigma S}$ находились указанным выше способом. Фон под линией стронция $N_{Sr S}$ находили по графику, аналогичному фиг.2.

Коэффициент $\alpha_{\Sigma Fe}$ может быть определен аналогичным образом, а $t_{\Sigma Fe}$ определен по результатам измерений стандартов с различным содержанием железа. Учитывая диапазон изменения содержания железа в геохимических пробах, эту процедуру можно упростить, аппроксимируя $(\alpha_{\Sigma Fe} + t_{\Sigma Fe} N_{Fe}) = \bar{\alpha}_{\Sigma Fe}$ постоянной величиной в каждом интервале содержаний железа. Рабочие интервалы выбирались на основе предварительных измерений проб с максимально возможной вариацией железа по данному участку геохимических поисков. Как правило, использовались два интервала: от 0 до 15% Fe и свыше 15% Fe , и в этих интервалах

$$\alpha_{\Sigma Fe} = \frac{N_{\Sigma} - N_{\Sigma S}}{N_{Fe} - N_{Fe S}}. \quad (5)$$

Величины, входящие в это выражение, определялись при измерениях стандартов с содержаниями железа соответственно 10% и 25%.

Таким образом, предлагаемый способ позволяет учитывать влияние каждой из регистрируемых детектором линий излучения. Он может быть использован при работе как с многоканальными, так и с мало- или одноканальными анализаторами, причем в последних двух случаях выделения дополнительных каналов для измерения фона или специальной перестройки канала не требуется. Это позволяет при

массовом анализе образцов в полевых условиях использовать более простую электронную аппаратуру. Особенно эффективно применение этого способа учета фона при определении суммарного содержания цинка, свинца и мышьяка, поскольку использование других известных способов не обеспечивает необходимой точности учета мешающих линий.

Определение суммарного содержания элементов

Способ выравнивания чувствительности. Важным этапом процедуры опробования является переход от измеренных интенсивностей аналитических линий (за вычетом фона) к содержаниям анализируемых элементов. Определение Σ по суммарной интенсивности характеристического излучения элементов, вообще говоря, не является вполне корректным. Равные содержания элементов дают различный вклад в общий счет их суммарной интенсивности. Это объясняется разными для каждого из элементов эффективностью возбуждения, квантовым выходом характеристического излучения и эффективностью регистрации.

В случае, когда соотношение элементов, входящих в определяемую сумму, остается постоянным, определение Σ по суммарной интенсивности излучения можно проводить так же, как определение отдельных элементов. На практике, однако, соотношение Zn, Pb и As в геохимических пробах может изменяться произвольно, поэтому только подбором уровней дискриминации погрешность РР-анализа, связанную с этими изменениями, устранить не удастся. В этом случае может быть использован способ выравнивания чувствительностей по каждому из элементов, входящих в определяемую сумму. Сущность его заключается в том, что равенство чувствительностей обеспечивается применением специального выравнивающего фильтра, устанавливаемого на пути вторичного излучения пробы [19]. Этот способ может быть применен при анализе на сумму большого числа соседних и других элементов с близкими по энергии аналитическими линиями. При этом элементы, входящие в выравнивающий фильтр, выбираются таким образом, что каждый из них является поглощающим (К-край поглощения чуть меньше энергии аналитической линии) для одного или большего числа элементов, входящих в сумму. Концентрации элементов в фильтре должны быть пропорциональны регистрируемому потоку излучения аналитических линий соответствующих анализируемых эле-

ментов (на единицу их концентрации).

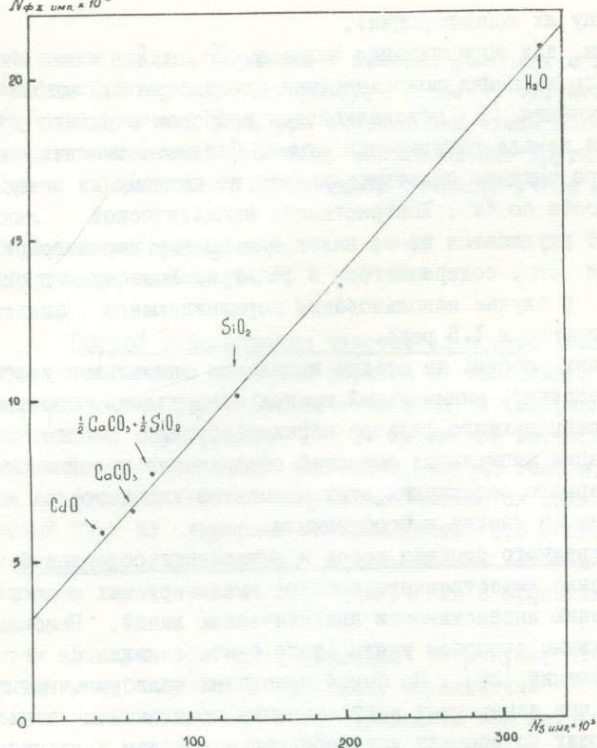
В частности, для выравнивания вкладов Zn и As может быть использован фильтр из цинка поверхностной плотностью $2,2 \text{ мг/см}^2$. Равный вклад излучения Pb обеспечивается подбором верхнего уровня дискриминации канала регистрации суммы. Следует отметить, что применение фильтра снижает чувствительность по каждому из элементов, и в особенности по As . Контрастность аналитической линии Zn дополнительно ухудшается из-за наложения на нее характеристического излучения Zn , содержащегося в фильтре. Поэтому предел обнаружения Σ в случае использования выравнивающего фильтра увеличивается примерно в 1,5 раза.

При поисковых работах на стадии выявления аномальных участков требуется обеспечить минимальный предел обнаружения, поэтому использование выравнивающего фильтра нецелесообразно. Вместе с тем, при детализации аномальных областей обеспечение правильного определения суммарного содержания этих элементов-индикаторов является желательным, а иногда и необходимым.

Учет вещественного состава пород и вычисление содержаний элементов. Изменение вещественного состава анализируемых пород приводит к изменению интенсивности аналитических линий. Наиболее простым и эффективным способом учета этого фактора является метод спектральных отношений [26]. На фиг.4 приведены калибровочные графики, полученные при измерениях искусственных комплексных эталонов, соответствующих по составу ультраосновным породам, гранитам и известнякам. Аналитическим параметром являлось отношение числа импульсов, набранных в энергетической зоне $7,8+11,7 \text{ кэВ}$, включающей линии $Zn K_{\alpha,\beta}, As K_{\alpha,\beta}, Pb L_{\alpha,\beta}$ за вычетом фона, к числу импульсов в зоне $18+21 \text{ кэВ}$ рассеянного первичного излучения. Применение метода спектральных отношений позволяет в 3-4 раза снизить погрешность, связанную с влиянием вариаций вещественного состава проб, по сравнению с методом, использующим в качестве аналитического параметра только интенсивность характеристического излучения элементов, и позволяет работать по единому эталонировочному графику. При этом погрешность определения Σ , вносимая изменением вещественного состава проб, не превосходит $\pm 15\%$. Использование метода спектральных отношений позволяет также частично компенсировать различие в плотности проб.

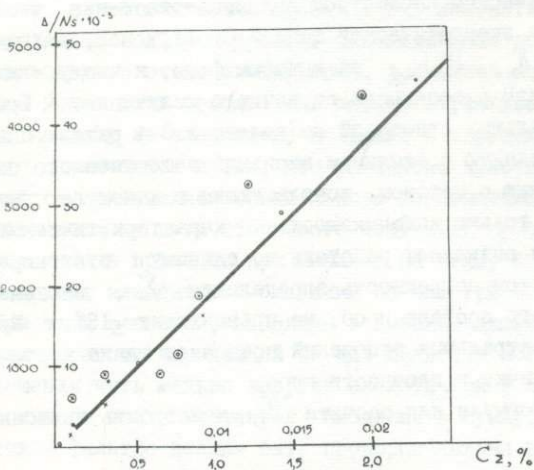
Таким образом, формула для расчета Σ может быть записана в виде

$N_{\text{фл}} \text{ умк.} \cdot 10^9$



Фиг. 3.

ЗАВИСИМОСТЬ
составляющей
фона, связанной
с рассеянным
возбуждающим
излучением, по-
лученной при
измерении раз-
личных веществ



Фиг. 4. Калибровочные
графики для определе-
ния суммарного содер-
жания цинка, свинца и
мышьяка в различных
породах

• - ультраосновные,
○ - граниты, × - изве-
стняки; условный знак
"0" соответствует мас-
штабу 100:1

$$C_{\Sigma} = K_{\Sigma} \frac{1}{N_S} (N_{\Sigma} - N_{\Sigma\Phi}), \quad (6)$$

где $N_{\Sigma\Phi}$ - счет от фона, определяемый по формуле (3); K_{Σ} - постоянный коэффициент, определяемый наклоном калибровочного графика; N_S , N_{Σ} - измеренные величины счета в канале рассеянного излучения и в канале Σ .

Как показывает опыт, расчет концентрации по этой формуле в условиях полевой лаборатории удобно осуществлять с помощью ЭКВМ "Искра-122". Наличие у нее пяти независимых ячеек памяти позволяет механизировать процедуру расчета, включая определение постоянных коэффициентов. Производительность расчетов не менее 1+2 проб/мин.

Для примера рассмотрим случай анализа проб рыхлых отложений, отбираемых в процессе площадной геохимической съемки (поиски по вторичным ореолам рассеяния). Было установлено, что содержание стронция в этих породах невелико (до 0,05+0,07%) и остается от пробы к пробе более или менее постоянным. Кроме того, содержание железа сохраняется достаточно высоким и колеблется в пределах от 5 до 10%. Поэтому можно пренебречь влиянием стронция, а также фоном под линией железа. С учетом этого, после подстановки постоянных коэффициентов формула (6) примет вид

$$C_{\Sigma} = K_{\Sigma} \frac{1}{N_S} [N_{\Sigma} - (\alpha_{\Sigma} + \alpha_{\Sigma S} N_S + \alpha_{\Sigma Fe} N_{Fe})]. \quad (7)$$

Как указывалось выше, при определении малых содержаний анализируемых элементов основная погрешность связана с учетом фона. По этой причине большое внимание уделяется контролю коэффициентов α_{Σ} , $\alpha_{\Sigma S}$, $\alpha_{\Sigma Fe}$ в формуле (7), определение которых может проводиться от одного до нескольких раз за рабочую смену в зависимости от условий работы аппаратуры (наличие сильных колебаний температуры воздуха, стабильности питающего напряжения и пр.). Коэффициент наклона эталонировочного графика при этом может корректироваться существенно реже.

Подготовка проб к анализу

С целью повышения экспрессности анализа отобранных геохимических проб возможно использование упрощенного способа их подготовки.

Твердые образцы керна, стенок шахтных выработок и т.п., ото-

бренные в количестве 200–500 г, подвергаются дроблению на щековой дробилке и отсеиваются через контрольное сито с ячейкой 1 мм. Образцы рыхлых отложений предварительно высушиваются, а необходимое для анализа количество материала отсеивается с помощью того же контрольного сита.

Возможность использования для анализа проб без истирания основана на том, что при уровне содержаний $1 \cdot 10^{-3} + 0,1\%$ (область перехода от геохимического фона к аномальным концентрациям) влияние вариаций самопоглощения и экранирования при определении цинка, свинца и мышьяка незначительно.

Подготовленные пробы насыпаются в чашечки и уплотняются вручную с помощью стеклянной пластинки. Для обеспечения "насыщенного слоя" пробы [26] высота чашечки должна быть не менее 8 мм; при этом практически удобнее, чтобы рабочий объем чашечки не превышал 15 см³.

Экспериментальная оценка влияния на результаты измерений крупности частиц и степени уплотнения пробы, проведенная с пробами керна и рыхлых отложений, показала, что такой способ подготовки проб к анализу является вполне удовлетворительным. В частности, сопоставление результатов опробования рыхлых и коренных пород, полученных РР-методом, с данными спектрального анализа тех же, но тонко истертых проб, показывают их хорошее соответствие. Простота и меньшая трудоемкость по сравнению с подготовкой проб для спектрального анализа являются важными факторами при проведении массового анализа геохимических проб.

Особенности применения метода
для опробования горных пород
в их естественном залегании

Дальнейшее повышение эффективности геохимических поисков можно обеспечить использованием методики опробования, не требующей отбора проб. К настоящему времени накоплен значительный материал по использованию такого вида опробования [1, 17] для исследования различных руд. Однако ряд вопросов проведения РР-опробования горных пород изучен недостаточно. Рассмотрим основные из этих вопросов: влияние влажности и органического материала, а также влияние неровностей измеряемой поверхности породы.

Влажность. Экспериментально оценивалось влияние влажности

пород на результаты определения суммы Σ . Измерения проводились с блоком детектирования на ПС СРМ-16, источником ^{119m}Sn активностью 20 мКири, пультом и блоком регистрации прибора "Тагара". На фиг.5 приведены данные по зависимости от влажности различных составляющих аналитического параметра. Из-за резкого увеличения интенсивности рассеянного излучения с увеличением влажности происходит заметное уменьшение спектрального отношения, составляющее около 10% при влажности до 10%. То есть при низких содержаниях определяемых элементов и влажности до 7+10% эта погрешность измерения не является определяющей.

Поэтому при опробовании может использоваться описанный в предыдущем разделе способ измерений (с учетом фоновых вкладов и рассеянного излучения). Результаты практической проверки способа на пробах с одного из профилей, представленные в табл.4, показывают, что реально возникающая относительная погрешность анализов при этом соответствует результатам лабораторных экспериментов, показанным на фиг.4.

Таблица 4
Влияние влажности проб на результаты определения Σ

№ пробы	Влажность пробы, отн.%	Результаты РР-анализа, $10^{-3}\%$		Относительное расхождение, %
		влажная проба	сухая проба	
I	15,0	16,7	17,8	-6,0
2	15,0	14,3	14,9	-4,0
3	14,3	14,8	15,9	-6,9
4	18,3	14,0	15,4	-9,1
5	7,4	14,3	14,8	-3,4
6	13,0	15,4	15,9	-3,1
7	4,0	15,4	14,8	+4,0
8	15,0	46,2	52,1	-11,3
9	15,0	85,0	98,2	-13,4
10	12,0	25,0	25,5	-4,9
11	11,2	14,3	15,7	-5,7
12	5,0	17,7	18,3	+3,2

Влияние органического материала. При проведении поисков по вторичным ореолам рассеяния основным объектом анализа является верхний, гумусовый горизонт почв (A_1). Этот горизонт содержит определенное количество органического материала (остатки растительного происхождения), содержание которого даже по точкам одного и того же профиля бывает существенно различным.

На фиг.6 показано относительное изменение результатов определения суммарного содержания цинка, свинца и мышьяка в естественной пробе (концентрация суммы этих элементов в исходной пробе составляет 0,13%) при последовательном добавлении в нее органического материала (в виде порошкового полистирола). На этом же рисунке представлены результаты по воспроизводимости анализа с различными содержаниями органического материала при концентрации Σ в исходной пробе, близкой к фоновой.

Приведенные экспериментальные данные свидетельствуют о том, что при содержаниях органического материала в образце до 6% относительное занижение результатов анализа не превосходит 10% (при аномальных содержаниях). При фоновых содержаниях суммы этих элементов относительная погрешность анализа не превосходит аппаратной среднеквадратичной погрешности измерений. Следует отметить, что в почвах, близких по составу к торфяникам, содержание органического материала существенно выше, и в зависимости от него погрешность результатов анализа может быть также существенно выше. В связи с этим возможность количественного РР-анализа этих почв представляет значительные сложности и должна быть рассмотрена специально.

Влияние и учет неровностей измеряемой поверхности. На результаты опробования оказывает влияние неровность поверхности или различное по отношению к ней положение блока детектирования при измерении коренных, а в некоторых случаях и рыхлых пород в их естественном залегании (когда выравнивание поверхности затруднено). Известные способы, основанные на использовании зондовых устройств [17], не всегда обеспечивают полное устранение этого эффекта. Рассмотрим основные причины влияния указанных факторов и способ их уменьшения.

Нами было установлено, что при соотношении энергии первич-

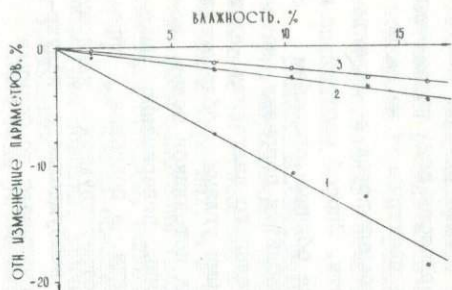
ного E_I и аналитического E_A излучения, характерном для решаемой задачи ($E_I \approx 22 \div 25$ кэВ и $E_A \approx 8 \div 11$ кэВ), основной причиной, ограничивающей возможности метода спектральных отношений как при использовании одиночных, так и двойных зондов, является существенное различие коэффициентов массового поглощения излучения с энергиями E_I и E_A в анализируемой среде. Это приводит к различному ослаблению (экранировке) вторичного излучения верхними слоями среды и особенно сильно проявляется при опробовании неровной поверхности. В частности, расчетные и экспериментальные данные показывают, что зависимости потоков характеристического и рассеянного излучения от расстояния h между поверхностью измеряемой среды и блоком детектирования имеют точки инверсии при

$$\frac{e}{h} \approx \sqrt[3]{2 \frac{M_{A(S)}}{M_I}},$$

где e — длина зонда; M_I , $M_{A(S)}$ — средние массовые коэффициенты ослабления первичного и характеристического (или рассеянного) излучения в исследуемой среде. Таким образом, положение инверсионных точек для различных по энергии линий не совпадает, что, в свою очередь, приводит к дополнительным трудностям при использовании обычных зондовых устройств.

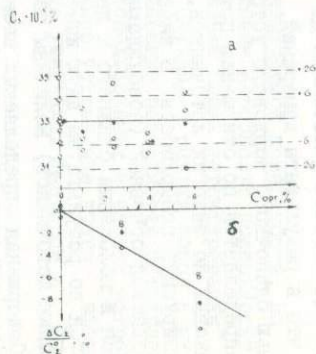
Проведенные исследования позволили предложить новый способ РР-опробования горных пород в условиях их естественного залегания. Сущность способа заключается в использовании двух потоков излучения, с одинаковой энергией облучающих поверхность под различными углами. При этом отношение величин потоков практически не зависит от вещественного состава и плотности облучаемых пород и характеризует эффективное расстояние до поверхности. Способ состоит в том, что в результате измерений, полученные обычным способом с помощью одиночного зондового устройства, вводится поправка, которая определяется по отношению потоков рассеянного излучения двух одинаковых по энергии источников, под разными углами облучающих анализируемую поверхность. В качестве таких источников может использоваться основной (возбуждающий) источник, попеременно находящийся в положении ближнего и дальнего зонда, а поправка определяется по результатам двух измерений (соответствующих каждому положению источников) величины рассеянного возбуждающего излучения. Содержания определяемых элементов рассчитывают по формуле

$$C_{\Sigma} = C_{\Sigma} K(\varepsilon), \quad (8)$$



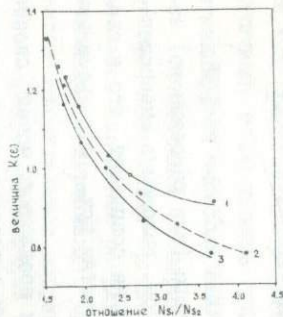
Фиг. 5. Зависимость различных параметров от влажности измеряемых проб

$$1 - (N_{\Sigma} - N_{\Sigma \text{ф}}) / N_{\Sigma}; 2 - N_{\Sigma} - N_{\Sigma \text{ф}}; 3 - N_{\Sigma}$$

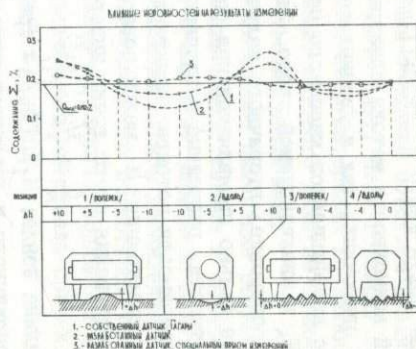


Фиг. 6. Зависимость результатов РР-опробования от количества органического материала в пробах рыхлых отложений

- а - при величине Σ близкой к геохимическому фону;
- б - при аномальном $C_{\Sigma} = 0,13\%$ значении Σ ;
- * - средние значения результатов РР-опробования;
- - единичные измерения



Фиг. 7. Результаты измерений поправочного коэффициента на образцах с различной формой поверхности



Фиг. 8. Иллюстрация влияния неровности измеряемой поверхности на результаты РР-опробования

- 1 - цилиндрическая / усредненные данные /
- 2 - плоская,
- 3 - бороздообразная / усредненные данные /

где C_{Σ} - суммарное содержание Zn , Pb и Mn , определенное по рассмотренной выше методике; $\varepsilon = N_{S1}/N_{S2}$ - отношение величин счета от рассеянного излучения при нахождении источника на месте ближнего N_{S1} и дальнего N_{S2} зондов; $K(\varepsilon)$ - поправочный коэффициент.

Величина коэффициента определяется по специальному графику. Для построения этого графика проводят измерения с плоским стандартным образцом, содержащим в сумме порядка 1% цинка, свинца и мышьяка (обозначим эту величину как C_{Σ}^{cr}). Образец помещают на различные расстояния h от входного окна блока детектирования и каждый раз определяют значения N_{Σ} , N_{S1} , N_{S2} , и по описанной выше методике (см. раздел - учет фона под аналитическими линиями) вычисляют величину $C_{\Sigma}^{i cr}$ регистрируемого аппаратурой суммарного содержания этих элементов. По результатам измерений строят график зависимости $K(\varepsilon) = C_{\Sigma}^{i cr} / C_{\Sigma}^{cr}$ от величины ε . Расстояние h варьирует в достаточно широком диапазоне, обычно $\pm 15-20$ мм от среднего расстояния до плоского образца, определяемого рабочей геометрией измерений.

При опробовании поверхностей горных пород производят определение C_{Σ} , N_{S1} и N_{S2} , вычисляют ε и по калибровочному графику находят поправочный коэффициент $K(\varepsilon)$. Если для определения C_{Σ} используется методика, описанная выше, необходимо произвести только одно дополнительное измерение величины N_{S2} . В принципе, введение указанной поправки на изменение расстояния до поверхности и ее неровность может быть использовано и при любом другом способе определения концентраций элементов.

Преимущества описанного способа по сравнению со способами измерения с одиночным и двойным зондом состоят в том, что а) компенсация изменения расстояния h от детектора до плоскости может осуществляться в более широком диапазоне h и при использовании любой методики определения содержаний анализируемых элементов; б) при использовании методики спектральных отношений калибровка по предлагаемому способу существенно проще, чем при измерении с двойным зондом; в) заметно снижается погрешность, связанная с различной экранировкой рассеянного первичного и характеристического излучения элементов неровностями поверхности. Это определяется тем, что одиночный зонд малой длины чувствителен к изменению h , однако достаточно хорошо компенсирует неровности, в свою очередь, двойной зонд имеет более глубокую область компенсации по h , но

и более чувствителен к неровностям, главным образом к тем, которые ориентированы перпендикулярно направлению большого зонда.

Как уже указывалось, для построения $K(\xi)$ может быть использован стандартный образец соответствующих размеров (например, $1,5 \times 15 \times 12$ см) с ровной плоской поверхностью. Возможность использования одного плоского образца для коррекции неровности поверхности не очевидна. Специальные измерения стандартных образцов с различной формой поверхности показали, что плоский образец обеспечивает близкое к среднему значение $K(\xi)$ по сравнению с другими образцами. Сопоставление проводилось с образцами, представляющими основные типы встречающихся на практике неровных поверхностей: цилиндрической выпуклой и вогнутой формы с максимальными отклонениями от плоскости ± 15 мм (радиус цилиндра около 17 см) и при направлении оси цилиндра вдоль и поперек оси счетчика; неровность в виде равномерных борозд, нанесенных на плоскую поверхность, также при их ориентации вдоль и поперек оси счетчика. Для каждого из указанных типов образцов при их различной ориентации определяли зависимость $K(\xi)$.

Данные измерений, представленные на фиг.7, показывают, что использование плоской поверхности обеспечивает приблизительно среднее значение поправочного коэффициента, поэтому в дальнейшем используется именно эта величина. Следует отметить, что для построения зависимости $K(\xi)$ не обязательно точно знать значения $C_{\Sigma}^{ст}$ и расстояний h , при которых определяются $C_{\Sigma}^{ст}$. Зависимость $K(\xi)$ находится для каждого блока детектирования один раз и может быть использована длительное время.

Результаты опробования некоторых типов "правильных" поверхностей с введением поправочного коэффициента приведены в таблице 5 и для наглядности изображены на фиг.8. Измерения проводили на пробе большого объема, отобранной на одном из участков с погребенным золото-сульфидным оруденением и имеющей содержание Σ , равное 0,193%. Измеряемой поверхности пробы придавали различную форму: выпуклую и вогнутую в виде цилиндрического мениска с различной кривизной, а также бороздообразную с амплитудой борозд ± 4 мм при среднем уровне, совпадающем с образующей плоскостью, и ниже него на 4 мм. В качестве блоков детектирования были использованы серийный датчик с пропорциональным счетчиком, входящий в комплект анализатора "Гагара", а также разработанный нами для полевых измерений датчик на основе счетчика СРМ-16, с источниками ^{119m}Sn , поз-

воляющий реализовать описанный в этом разделе способ измерения. При измерениях с датчиком "Гагара" содержания рассчитывали по методике, описанной в разделе об учете фона под аналитическими линиями, а при измерениях с разработанным нами датчиком — как по этой методике, так и с введением поправки $K(\xi)$.

Из приведенных данных видно, что способ измерения с введением поправочного коэффициента позволяет существенно уменьшить погрешность определения содержания, связанную с неровностями рассмотренного типа.

Кроме того, на этой пробе проводили измерения с моделями неровностей произвольной формы. После каждого замера поверхность пробы заново выравнивалась и производилось измерение плоской поверхности. Как видно из табл. 6, погрешность РР-анализа с использованием предлагаемого способа также существенно уменьшается.

Схема конструкции блока детектирования, позволяющая реализовать способ опробования с введением поправочного коэффициента, показана на фиг. 9. Для определения поправки $K(\xi)$ проводят дополнительное измерение интенсивности рассеянного излучения, при котором контейнеры с источниками ^{119m}Sn смещены симметрично в обе стороны на максимальное расстояние от входного окна блока детектирования. Преимущества подвижных контейнеров заключаются в более полном использовании активности источников и упрощении настройки блока.

В конструкции использованы материалы, не содержащие в заметных количествах медь, цинк, мышьяк, свинец и другие мешающие элементы. Необходимая свинцовая защита покрыта фольгой из металлического кадмия толщиной 0,2 мм. Для снижения фона рассеянного излучения нерабочая поверхность счетчика была покрыта слоем кадмия толщиной в 1 мм. Герметизация блока детектирования надежно обеспечивается с помощью резиновой прокладки (4), уплотнений на разъемах и лавсановой пленки или алюминиевой фольги, перекрывающей входное окно. При анализе отобранных проб станина (2) заменяется на приставку, снабженную держателем проб и собственным креплением источников.

Примеры использования метода

Полевые работы проводились с помощью переносного анализатора типа "Гагара" в сочетании с разработанным блоком детектирова-

Таблица 5

Сопоставление результатов измерений C_{Σ} при различной форме опробуемой поверхности

Характеристика поверхности		Результаты измерений C_{Σ} , %			Относительное отклонение, %		
		"Тагара"	РД	РД К(Е)	"Тагара"	РД	РД К(Е)
Ориентация	Тип и величина неровности, мм						
Вдоль оси счетчика	- 10	0,131	0,165	0,204	-31,7	-14,2	+5,9
	Вогнутая - 5	0,155	0,182	0,206	-19,3	- 5,4	+7,0
	+ 5	0,219	0,219	0,201	+13,9	+13,9	+4,6
	Выпуклая + 10	0,271	0,240	0,188	+40,9	+24,8	-2,4
Поперек оси счетчика	- 10	0,134	0,164	0,196	-30,5	-14,6	+2,1
	Вогнутая - 5	0,166	0,178	0,196	-13,8	- 7,2	+1,7
	+ 5	0,213	0,224	0,203	+10,8	+16,3	+5,6
	Выпуклая + 10	0,252	0,250	0,210	+30,9	+30,0	+9,4
Вдоль оси	Борозды 0	0,188	0,187	0,192	- 2,4	- 2,6	+0,1
	± 4 на уровне	- 4 0,159	0,166	0,187	-17,2	-13,8	-2,5
Поперек оси	Борозды 0	0,196	0,184	0,182	+ 2,0	- 4,3	-5,5
	± 4 на уровне	- 4 0,162	0,172	0,185	-15,6	-10,5	-3,5
Среднее содержание		0,187	0,194	0,196			
Среднеквадратичное отклонение, %		44,6	30,6	7,9			
Плоскость, среднее по 12 замерам		0,192	0,192	0,194			
Среднеквадратичное отклонение, %		6,1	5,8	6,3			

Примечание: РД - разработанный блок детектирования на счетчике СРМ-16. За истинное значение приняли результаты опробования ровной поверхности,

$$C_{\Sigma} = 0,193\%$$

Таблица 6

Результаты опробования образцов с произвольными неровностями поверхности

Условный номер типа неровной поверхности	Результат измерений $C_{\Sigma}, \%$		Относительное отклонение от результатов на плоскости, %	
	РД без поправки	РД с поправкой К(Е)	РД без поправки	РД с поправкой К(Е)
I	0,203	0,197	+ 5,6	+ 1,7
2	0,207	0,198	+ 7,7	+ 2,1
3	0,169	0,194	-11,9	+ 0,2
4	0,219	0,210	+14,1	+ 8,5
5	0,214	0,195	+11,3	+ 0,6
6	0,211	0,189	+10,0	- 2,2
7	0,164	0,202	-14,3	+ 4,6
8	0,203	0,187	+ 5,8	- 3,2
9	0,262	0,215	+36,6	+11,2
10	0,201	0,196	+ 4,7	+ 1,6
11	0,160	0,190	-16,4	- 1,8
12	0,179	0,190	- 6,9	- 1,6
13	0,209	0,202	+ 9,1	+ 4,4
14	0,169	0,194	-12,1	+ 0,3
15	0,187	0,193	- 2,6	- 0,1
16	0,178	0,191	- 7,1	- 1,3
Среднее содержание $C_{\Sigma}, \%$	0,196	0,197		
Среднее для плоскости	25,3	8,3		
	0,192	0,193		

ния на счетчике СРМ-16. Характерные данные по точности результатов опробования, полученные в полевой лаборатории и при измерениях в условиях естественного залегания горных пород, приведены в табл.7. Относительное среднеквадратичное расхождение результатов основных и повторных определений σ вычислялось по данным 60+ +100 параллельных определений.

Таблица 7

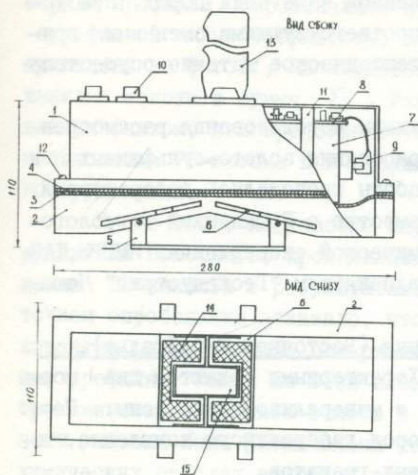
Относительная погрешность определения суммарного содержания цинка, свинца и мышьяка

Условия измерений	Диапазон содержаний, %	Среднее содержание, %	Фактическое расхождение 2,83 σ , %
Полевая лаборатория	0,01-0,019	0,015	24
	0,02-0,049	0,030	18
	0,05-0,099	0,061	14
	0,10-0,199	0,142	11
Измерения в естественном залегании пород	0,01-0,019	0,016	41
	0,02-0,049	0,028	28
	0,05-0,099	0,073	20

Контроль правильности проводился по данным химического количественного спектрального и нейтронно-активационного анализа. Сопоставление результатов основных и контрольных анализов показало отсутствие значимого расхождения.

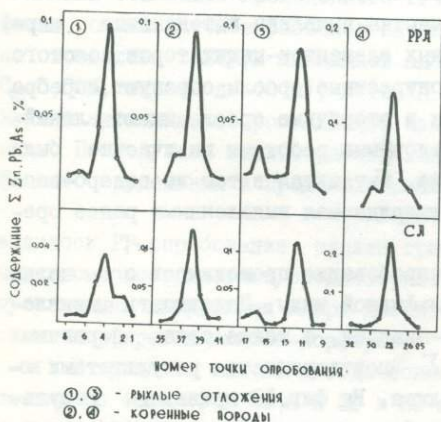
Производительность анализа отобранных проб составляет 100-120 шт. в смену на прибор, включая подготовку проб и обработку результатов измерений (бригада из 3-х человек). При опробовании пород в их естественном залегании производительность в среднем равна 60 точкам опробования на бригаду из 2-3 человек.

Поисковые работы с привлечением РР-метода опробования могут проводиться силами геохимической партии или отдельного отряда. В первом случае целесообразно иметь комплект РР-аппаратуры для экспресс-анализа отобранных проб и 1-2 комплекта переносной аппаратуры. Практика показывает, что для надежного электрического питания полевой лаборатории достаточно автономной бензиновой станции АБ-1-Т-230 (мощность 1 кВт), а сама аппаратура может быть размещена в автомобильном прицепе или палатке. В поисковом отряде один РР-прибор может использоваться как для анализа отобранных

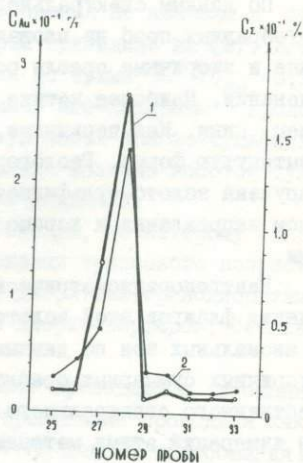


Фиг. 9. Схема конструкции блока детектирования на счётчике СПМ-16

1-кожух, 2- станина, 3-кадмиевая прокладка, 4- опора, 5- держатель источника, 6- пропорциональный счётчик, 7- монтажная плата предусилителя, 8- высоковольтный разъем, 9- крепление счётчика и предусилителя, 10- входной разъем, 11- ручка, 12- источник, 13- винт, 14- входное окно счётчика, 15- входное окно счётчика



Фиг. 10. Сопоставление результатов измерения проб с двух участков по рыхлым и коренным породам, полученных с помощью разработанной методики РР-опробования и количественного спектрального анализа



Фиг. 11. Сравнение результатов РР-опробования рыхлых отложений на $\Sigma/2$ и инструментального нейтронно-активационного анализа тех же пород на золото/1/

проб, так и для измерений в естественном залегании пород, при условии, что он укомплектован двумя соответствующими сменными приставками к блоку детектирования. Электрическое питание осуществляется от батарей или аккумуляторов.

Ниже приводятся некоторые примеры использования рассмотренных методик РР- выявления ореолов рассеяния золото-сульфидных и полиметаллических месторождений. Работы проводились лабораторией ядерно-физических методов ИМГРЭ совместно с Бронницкой геолого-геохимической и Центральной геохимической экспедициями ИМГРЭ, КАЗ-12 НПО "Аэрогеология", а также предприятием "Геоиндустрия" Чешского Геологического Учреждения.

Золото-сульфидные месторождения (Восточное Забайкалье).

Месторождение Дарасун. Характерными являются два морфологических типа рудных тел: жилы и минерализованные зоны. Первые распределены в поле развития пород габброидного комплекса, вторые - среди мелкозернистых биотитовых гранитов.

По данным спектрального приближенно-количественного анализа отобранных проб на площади участка выявлены интенсивные первичные и вторичные ореолы основных элементов-индикаторов золотого оруденения. Наиболее четкие и контрастные ореолы образуют серебро, свинец, цинк. Как первичные, так и вторичные ореолы имеют линейно вытянутую форму. Геологоразведочными работами на участке была обнаружена золото-сульфидная жила, вытянутая в том же северо-восточном направлении и хорошо подтверждаемая выявленными ранее ореолами.

Рентгенорадиометрическое опробование проводилось с целью изучения флангов этой золото-сульфидной жилы. Надежность выявления аномальных зон по данным РР-анализа, а также связь первичных и вторичных суммарных ореолов Σ подтверждается результатами количественного спектрального анализа. На фиг.10 приведены результаты измерений этими методами проб по двум профилям, проходящим над известной золото-сульфидной жилой как по коренным, так и по рыхлым породам. Пробы почв отбирались в тех же интервалах, в которых проводилось опробование коренных пород. Как видно из рисунка, имеется также достаточно тесная корреляция пространственного положения аномальной зоны по вторичным и первичным ореолам.

Для установления прямой корреляции между содержанием золота и суммы Σ в рыхлых отложениях были произведены анализы нейтронно-активационным методом на золото для проб, отобранных нами

с ряда профилей, пересекающих известную часть погребенной золото-сульфидной жилы. Результаты, полученные по одному из профилей, приведены на фиг. II. Наблюдается четкая зависимость между содержаниями золота и суммы Σ . Указанное обстоятельство является важным фактом, непосредственно подтверждающим обоснованность использования РР-метода при геохимических поисках золото-сульфидного оруденения.

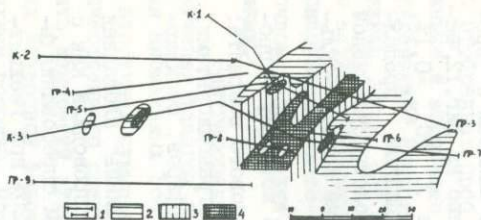
Кроме того, на участке параллельно с РР-опробованием сотрудниками БГЭ ИМГЭ проводилась газортутная съемка. Сравнение данных РР-анализа с результатами газортутного метода по тем же точкам опробования показало, что оба вида анализа дают сходный характер распределения содержаний ртути и суммы Σ как по отдельным профилям, так и по всей площади участка. По результатам спектрохимического анализа золота в пробах коренных и рыхлых пород данного участка была установлена тесная корреляция содержания в геохимических ореолах золота и ртути.

На основании проведенного РР-опробования по канавам и профилям, схематическое расположение которых приведено на фиг. I2, четко определены контуры площадной аномалии по сумме Σ ($C_{ан.} = 0,1\%$, $C_{ф.} = 0,02\%$, ширина до 40 м), которая явилась юго-западным продолжением аномалии, сопровождающей известную часть золото-сульфидной жилы. Последующие горные работы подтвердили наличие золото-сульфидного оруденения в пределах выявленной аномалии.

Участок Соколан, по которому проводилось РР-опробование, сложен гранитоидами триасового возраста: неравномернозернистыми, среднезернистыми диоритами, гранодиоритами, прорванными интрузиями кварц-диоритов и диорит-порфиров, бескварцевых порфиров и диабаз-порфиров.

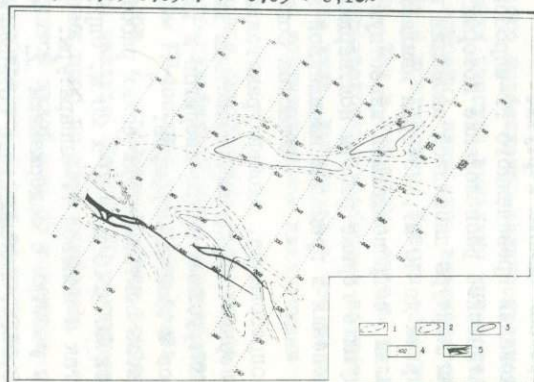
В процессе опытно-методических работ проводилась площадная съемка по сети 20 x 10 м и 50 x 20 м. Опробование проводили как с переносной, так и полевой РР-аппаратуры. По данным опробования были оконтурены участки с содержанием Σ выше 0,025% при геохимическом фоне 0,015%. Максимальные содержания Σ в отдельных пробах достигали 0,04%. Результаты оконтуривания, приведенные на фиг. I3, показали, что на участке выхода интрузий диорит-порфиров (правый берег р. Соколан) содержание Σ не превосходит фоновых. Составление со спектральным анализом подтвердило полученные результаты.

Результаты, указывающие на перспективность применения РР-



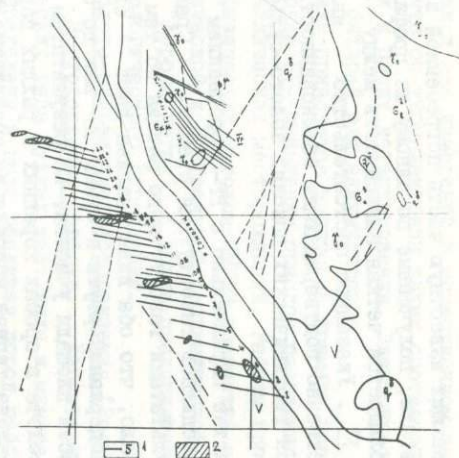
Фиг. 12. Схема расположения профилей и содержаний на участке *Дарасун*

Изоконцентраты: 1- 0,02%, 2- 0,02+0,03%,
3- 0,03+0,05%, 4- 0,05 + 0,10%



Фиг. 14. Геохимическая карта вторичных ореолов рассеяния Σ элементов участка *Аленуй*

Изоконцентраты: 1- 0,029%, 2- 0,037%,
3- 0,046%, 4- номера точек опробования,
5- рудные тела



Фиг. 13. Геохимическая карта вторичных ореолов рассеяния Σ элементов на участке *Соколан*

1- условное обозначение профилей;
2- изоконцентрата- 0,02 + 0,04%

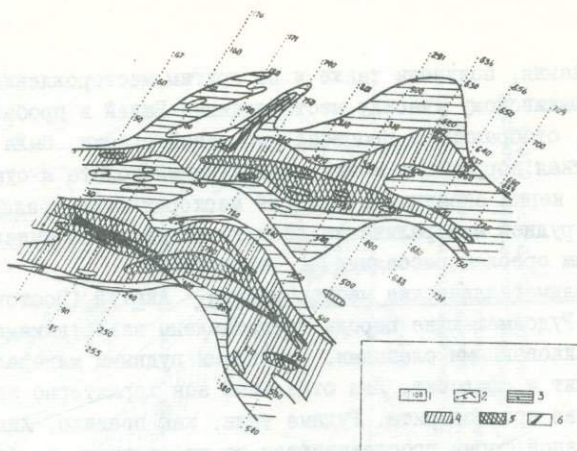
—опробования, получены также и по другим месторождениям. Например, по Андрюшкинскому участку месторождения Балей в пробах рыхлых отложений, отобранных в процессе площадной съемки, была также выявлена четкая корреляция между содержаниями золота и суммы Σ . Анализ проб керна скважин (по одному из месторождений Урала) показал, что области рудной минерализации достаточно уверенно выделяются по первичным ореолам рассеяния Σ элементов.

Полиметаллические месторождения. Акатуй (Восточное Забайкалье), Рудовмещающие породы представлены известняками, сланцами и ороговикованными сланцами. Основными рудными минералами являются галенит и сфалерит. Для отдельных зон характерно значительное количество арсенопирита. Рудные тела, как правило, линзообразной и жлобообразной формы прослеживаются по простиранию не более, чем на 100 м, и на глубину до 150 м, мощность от 2 до 10 м. Наиболее протяженные и контрастные ореолы дают серебро, свинец, цинк, мышьяк, галлий, барий, никель. Протяженность первичных ореолов несколько десятков, а вторичных — до сотен метров.

На участке Аленуй РР-опробование проводили по сети 100 x 100 м с глубины 10+30 см. Величина геохимического фона суммы Σ составила 0,023%. Геохимическая карта, составленная по данным опробования, показана на фиг.14.

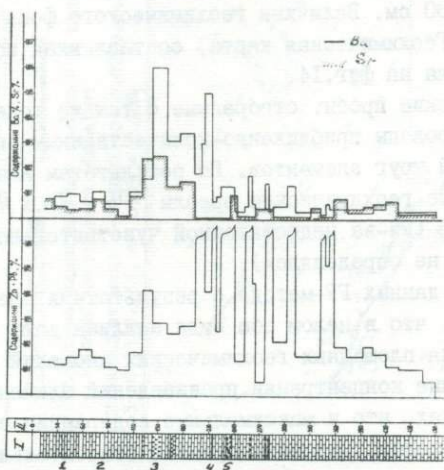
Геохимические пробы, отобранные с тех же точек опробования, были проанализированы приближенно-количественным спектральным анализом на широкий круг элементов. По результатам анализа построены мультипликативные геохимические ореолы $Pb \times Zn \times Ag \times Cu$, приведенные на фиг.15 (из-за недостаточной чувствительности анализа мышьяк в пробах не определялся).

Сравнение данных РР-метода с результатами спектрального анализа показывает, что в целом оба вида анализа дают сходный характер распределения площадных геохимических аномалий на данном участке. Максимальные концентрации произведений элементов отмечаются на тех же участках, что и максимальные содержания суммы элементов, полученные РР-методом. Смещение ореолов относительно рудных тел незначительно и не превышает первых десятков метров. Оси ореолов ориентированы согласно рудоконтролирующим структурам, а также зонам гидротермального изменения пород. Характеристики ореолов, выявленные по данным РР-опробования, приведены в табл.8. На флангах участка зафиксированы новые интенсивные ореолы рассеяния, не охваченные детальными геологическими исследованиями прошлых лет.



Фиг. 15. Геохимическая карта мультипликативных ореолов рассеяния Pb, Zn, Ag, Cu участка Аленуй по данным приближенно-количественного спектрального анализа

I-профили опробования, 2- рудные тела, 3- ореолы- $0,2 \cdot 10^{-10} + 1 \cdot 10^{-10}$; 4- $1 \cdot 10^{-10} + 10^{-10}$; 5-свыше 10^{-10}



Фиг. 16. Результаты опробования ядра скважины на сумму элементов Σ , а также Zn и Ba

I- геологический разрез, II- глубина/м/;

1- известняки, 2- доломиты, 3- даяковая порода, 4- массивная пирит-галенит-сфалеритовая руда, 5- рудный интервал

Помимо вторичных ореолов, проводилось изучение первичных ореолов рассеяния по керну скважин. Результаты РР-опробования по одной из скважин участка Акатуй на сумму Σ , а также стронций и барий показаны на фиг.16. Опробование на барий проводили по методике, описанной ниже в главе 2. Скважина пересекала доломитизированные известняки с включениями пирита и арсенопирита, дайковые породы, отдельные прожилки пирита и талька и вышла в граниты. Рудная зона имела мощность около 40 м; оруденение представлено сфалерит-галенитовой минерализацией. На фиг.16 отчетливо выявляются первичные ореолы суммы Σ в надрудной и подрудной зонах. Стронций и барий формируют широкие ореолы в надрудной зоне, причем сходство распределений этих элементов повышает надежность выявления ореола, а также подтверждает достоверность результатов РР-анализа, проводимого на эти элементы с различной аппаратурой.

Путинцевское месторождение (Рудный Алтай). Площадь работ была перекрыта современными эквивалентно-делювиальными образованиями мощностью от 2 до 20 м. Измерения также проводились по гумусовому горизонту почв на глубине 10-30 см по сети 100 x 20 м или 100 x 10 м. Особенность данного участка состояла в том, что вблизи расположения рудных тел отмечалось повышенное содержание не только Zn и Pb , но и Cu . Установлено, что в ряде случаев ореол рассеяния меди имел большую интенсивность по сравнению с цинком и свинцом. Для того, чтобы включить медь в сумму определяемых элементов, канал регистрации характеристического излучения этих элементов настраивается и на К-серии меди. Последнее достигается за счет расширения энергетической зоны регистрации в область меньших энергий - до 7,6+11,7 кэВ.

Таблица 8

Параметрическая характеристика вторичных ореолов участка Аленуй, выявленных по данным рентгенорадиометрического анализа

Номер аномалии	Размеры ореолов, м		Концентрация в ореоле, %	
	длина	ширина	C_{cp}	C_{max}
I	500	80	0,191	0,840
II	240	60	0,069	0,081
III	200	30	0,139	0,280
IV				
(рудное тело № 2)	550	100	0,088	0,194

Площадное РР-опробование участка на сумму Σ плюс медь позволило выявить существенно более широкие аномальные области ореолов рассеяния, а также самостоятельные аномалии, связанные с повышенным содержанием меди.

Месторождение "Пришибрам" (Чехословакия). Опытные методические работы были проведены на двух участках ("Миллин" и "Глубош") с целью оценки возможности применения аппаратуры типа "Гагара" при геохимических поисках месторождений полиметаллических руд в условиях ЧССР.

Использовался блок детектирования с пропорциональным счетчиком СИ-6Р и радиоизотопным источником ^{109}Cd . Все измерения выполнялись по стрелочному индикатору (без пересчетного блока), что облегчило работу на профилях (за счет уменьшения веса комплекта) и позволило уменьшить время анализа до 1-2 мин на точке. При этом порог обнаружения суммы Σ составил $7+8 \cdot 10^{-3}\%$, что в большинстве случаев оказалось достаточным.

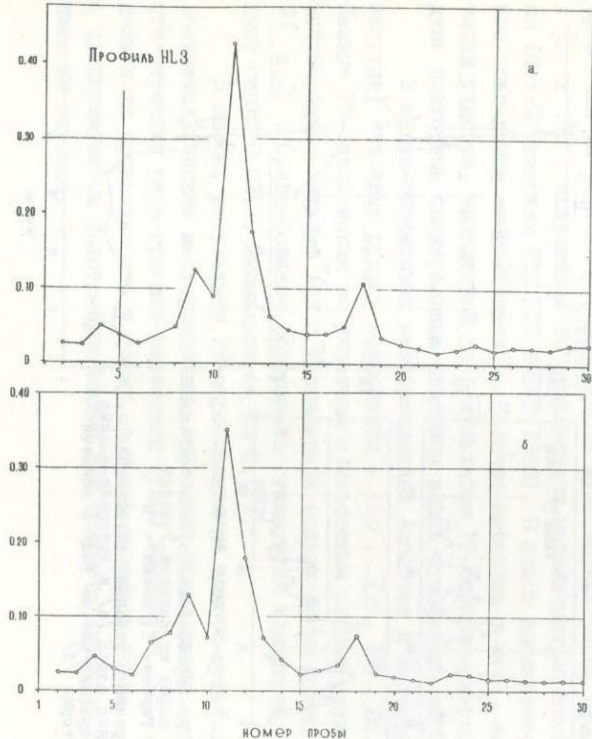
Экспериментальные работы включали в себя следующие этапы.

1. Экспресс-анализ отобранных проб по нескольким профилям и скважинам и сопоставление с результатами атомно-абсорбционного анализа этих проб на Zn , Pb . Некоторые из полученных данных приведены на фиг.17. Они свидетельствуют о полной идентичности результатов и подтверждают возможность выявления участков с аномальным содержанием элементов-индикаторов.

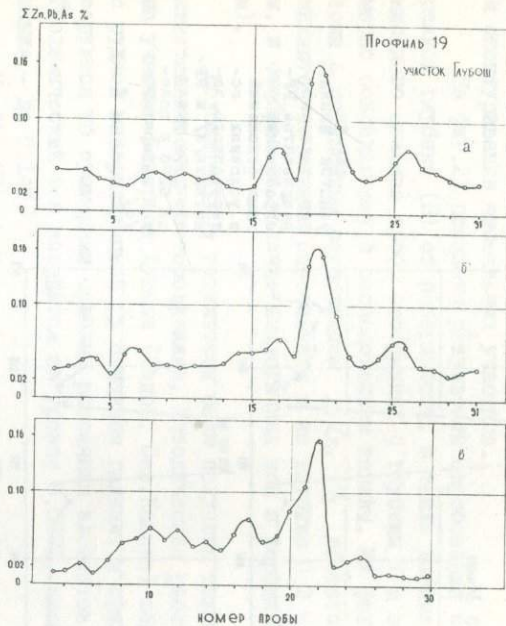
2. Опробование рыхлых образований в условиях их естественного залегания на глубине 0,2 м от поверхности с целью оценки возможности выявления аномалий при такой методике опробования. После окончания измерений на каждой точке профиля отбирали пробу для последующего измерения на приборе "Гагара" в условиях полевой лаборатории. После высушивания пробы просеивали через сито 1-2 мм и для измерений использовали фракцию < 2 мм без дополнительного истирания. Полученные результаты приведены на фиг.18 и 19 и показывают вполне удовлетворительное совпадение данных измерений в естественном залегании и экспресс-анализа отобранных проб, а также возможность уверенного выявления аномалий от 0,01-0,02% Σ и выше по данным опробования.

3. Опробование стенок канав путем измерений в естественном залегании и анализа отобранных проб в полевой лаборатории для выявления и оконтуривания участков с повышенным содержанием ΣPb , Zn . Некоторые результаты показаны на фиг.20. Наблюдается хоро-

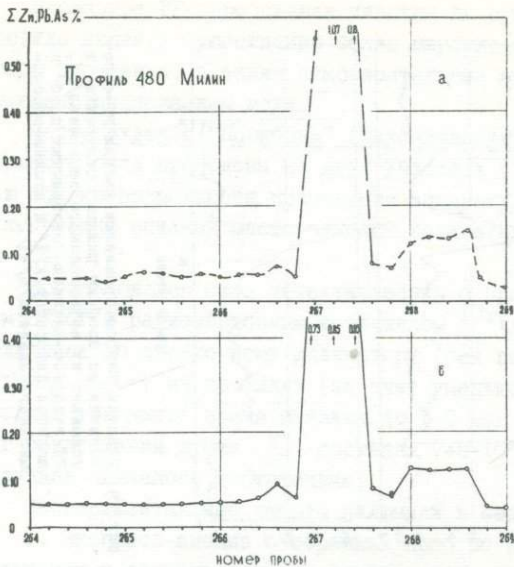
Σ Zn, Pb, As %



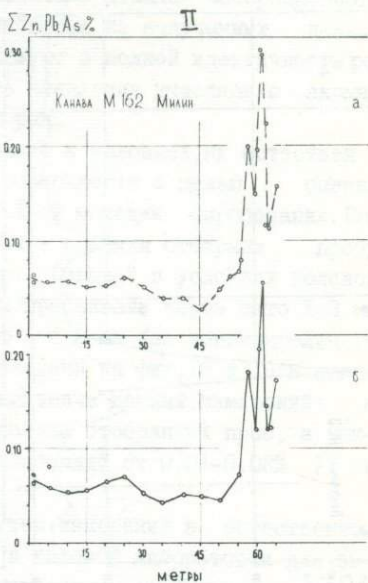
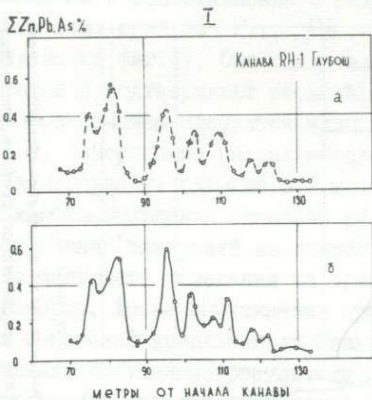
Фиг. 17. Результаты РР-анализа/а/ и атомно-абсорбционного анализа/б/ проб рыхлых отложений по профилю, проходящему над слепым полиметаллическим рудным телом



Фиг. 18. Участок Глубом. Сравнение данных РР-опробования по профилю рыхлых отложений в условиях их естественного залегания/а/, РР-экспресс-анализа отобранных проб в полевой лаборатории/б/ и атомно-абсорбционного анализа/в/



Фиг.19.
участок Милин.
Сопоставление
результатов РР-
опробования ры-
хлых отложений
в условиях ес-
тественного за-
легания/а/ и РР-
экспресс анали-
за проб в поле-
вой лаборатори
/б/



Фиг.20. РР-опробование коренных пород по канавам. Участок Глубош - I, Милин - II

Измерения в условиях естественного залегания пород /а/ и экспресс-анализ проб /фракция-меньше 1мм/ в полевой лаборатории /б/

шее совпадение результатов, подтверждающее возможность выявления и оконтуривания аномальных участков.

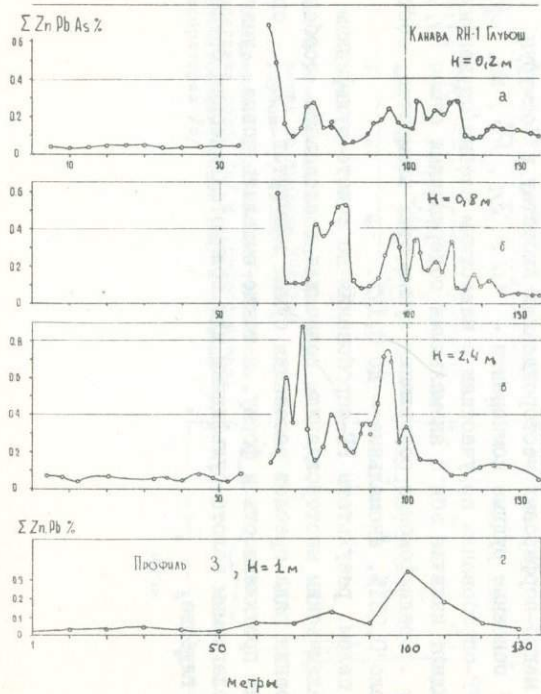
На фиг.21 показаны результаты опробования стенки канавы на разной глубине (Н) от поверхности, а также данные атомно- абсорбционного анализа проб, отобранных с глубины 1 м по профилю, примерно совпадающему с расположением канавы. Из фиг.21 видно, что зоны с повышенным содержанием $\sum Zn, Pb$ достаточно надежно выявляются по данным опробования и на глубине 0,2 м, и на глубине 0,8 м, и отображают наличие аналогичных зон в коренных породах (Н=2,4 м).

Положительные результаты были получены также на других полиметаллических месторождениях. Методические работы, выполненные на участке Северное Хукали (Садон, Сев.Кавказ) показали, что зоны с рудной минерализацией (в основном галенит и сфалерит) четко фиксируются по суммарным ореолам рассеяния элементов, входящих в \sum . Геохимический фон находится на уровне 0,027%, аномальные содержания - до 0,14%.

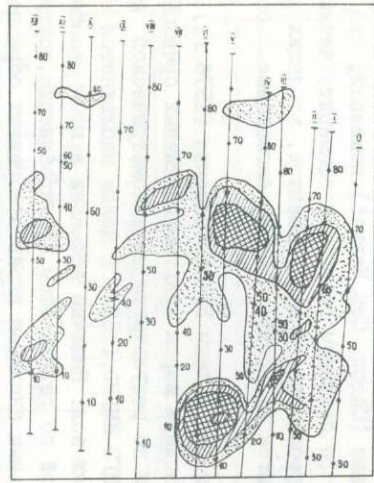
На фиг.22 показаны результаты РР-опробования (1976 г.). Для сравнения на фиг.23 приведена карта мультипликативных ореолов Cu x Zn x Pb , полученная по результатам металлометрической съемки (Сев.Кавказская РТП ЦЭ ИМГРЭ, 1968). В целом наблюдается четкое совпадение аномальных зон. Наличие аномалии в юго- восточной части участка, выявленной по результатам РР-опробования, подтверждено повторным спектральным анализом вновь отобранных образцов.

В медно-порфировых месторождениях Акбастау и Космурун (Казахстан) основные рудные компоненты - Cu, Zn, Pb, Mo, Ag . Данные РР-опробования по участкам с известным слепым оруденением подтверждают наличие зон с аномальными содержаниями суммы Cu, Zn, Pb и As . Среднефоновые содержания суммы этих элементов составляют около 0,031%, аномальные - до 0,17%.

В целом, результаты РР-опробования по золото-сульфидным и полиметаллическим месторождениям позволили исследовать особенности строения ряда ореолов рассеяния суммы элементов \sum , определить их протяженность и форму, а также выделить новые участки с предполагаемым золото-сульфидным или полиметаллическим оруденением на глубине.

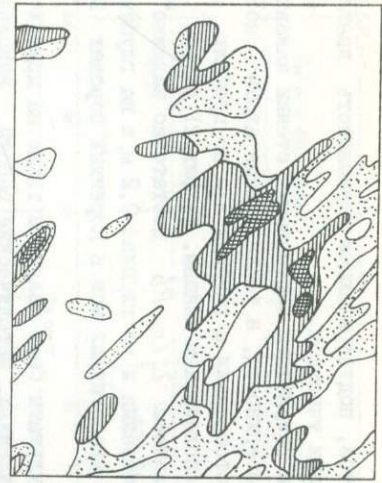


Фиг. 21. Зависимость результатов РР-опробования /а, б, в/ и атомно-абсорбционного анализа пород /г/ от глубины опробования /участок Глубов/



Фиг. 22. Геохимическая карта вторичных ореолов рассеяния Σ элементов по Северо-Хукалинскому участку, полученная по данным РР-опробования

Изоконцентраты: 1-0,04-0,06 ;
2- 0,06-0,1; 3- более 0,1%; 4-номер профиля и точки опробования



Фиг. 23. Карта мультипликативных ореолов Zn, Pb, Cu по Северо-Хукалинскому участку, полученная по данным приближенно-количественного спектрального анализа

Интенсивность ореолов в %-системе выражения результатов анализа: 1- 80-600, 2- 700-6000, 3 - более 6000

Глава II. ВЫЯВЛЕНИЕ АНОМАЛЬНЫХ СОДЕРЖАНИЙ БАРИЯ

Барий является важным геохимическим индикатором оруденения для многих типов собственно баритовых и комплексных месторождений: золото-баритовых, флюорит-баритовых, полиметаллических, медных, вольфрам-молибденовых и др. [6]. Вместе с тем барий является "удобным" элементом для определения его РР-методом.

Кларковые содержания бария в горных породах составляют около $5 \cdot 10^{-2}\%$, а у близких к нему по атомному номеру элементов, которые могут влиять на результаты опробования (*Cs, La, Xe, Ce, Y, Pr, Te, Nd*), кларки содержания меньше, чем в 10 раз. Кроме того, большинство этих элементов не характерны для указанных геологических объектов.

Поэтому опробование горных пород на барий сравнительно просто может быть выполнено с использованием распространенной полевой РР-аппаратуры, имеющей относительно невысокое энергетическое разрешение: "Минерал-4", "Тагара", "БРА-6" и др. (см., например [26, II, 24]).

Условия измерений

При анализе на барий в качестве аналитических линий удобно использовать К-серию его характеристического излучения, а возбуждение этой серии осуществлять с помощью радиоизотопного источника ^{241}Am активностью 90-200 мКюри (см. табл. 2). Поскольку влиянием соседних мешающих элементов можно пренебречь, регистрация вторичного излучения проводится с помощью СС на основе тонкого кристалла $\text{NaI}(\text{Te})$ или ПС с криптоновым наполнением (например типа СРЮ-100 или СРМ-5). Для обеспечения высокой контрастности аналитической линии в аппаратурном спектре вторичного излучения и достаточно большой скорости счета, оптимальную величину потока вторичного излучения, падающего на детектор, подбирают с помощью коллиматора. Последний изготавливается в виде свинцовой пластины толщиной 2-4 мм с цилиндрическим или коническим (угол при вершине около 30°) отверстием и устанавливается непосредственно перед детектором.

Диаметр коллиматора и ширина окна дискриминатора, настроенного на аналитическую линию бария, подбираются экспериментально таким образом, чтобы обеспечить минимальное значение величины

$$P = \frac{\sqrt{N_{\phi}}}{N_{\text{вк}} - N_{\phi}},$$

где N_{ϕ} – скорость счета фона в аналитическом канале; N_{Ba} – скорость счета от аналитической линии в том же канале. Измерения проводят на фоновом и бариевом стандартах (описание см. ниже).

Практически установлено, что близкое к оптимальному соотношение аналитического и фоновых сигналов достигается при диаметре коллиматора 10–25 мм и измерении в следующих энергетических зонах: 29–35 кэВ – К-серия бария и 44–55 кэВ – рассеянное излучение от источника ^{241}Am при работе на СС NaJ ; 18,4–20,4 кэВ – пик вылета криптонового счетчика для К-серии бария и 47–52 кэВ – рассеянное излучение ^{241}Am при работе на ПС с криптоновым наполнением.

Энергетическое разрешение по пику вылета криптонового ПС в 3–4 раза лучше, чем по пику полного поглощения К-серии бария при измерении на СС. Это преимущество ПС позволяет использовать их при анализе сложных по составу образцов, когда влиянием мешающих элементов пренебречь нельзя. Вместе с тем необходимо учитывать, что ПС обладают значительно меньшей эффективностью регистрации и позволяют проводить измерения при интегральных импульсных нагрузках до $0,5 + 1,0 \cdot 10^4$ имп/сек (СС – до $5 \cdot 10^{-4}$ имп/сек).

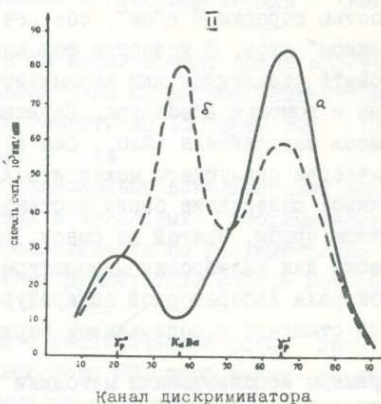
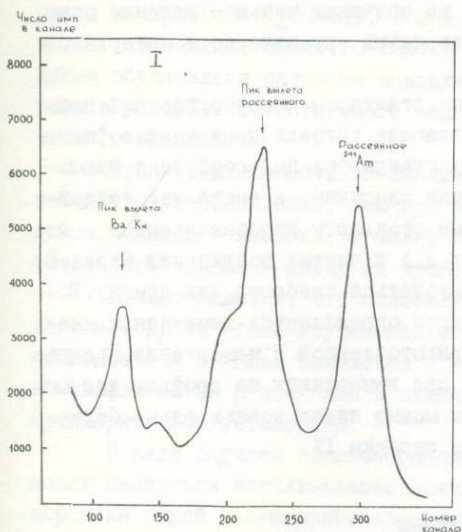
Характерные спектрограммы вторичного излучения образцов при РР-анализе на барий, полученные с СС в сочетании с аппаратурой "Тагара" и ПС с использованием многоканального анализатора, приведены на фиг. 24. Предел обнаружения бария для времени измерений 1–2 мин составляет для обоих типов детекторов пород около $5 + 8 \cdot 10^{-3}\%$.

Методика измерения и подготовка стандартов

Учет фона под аналитической линией бария проводится по методике, описанной в главе I, и в отсутствие заметных количеств мешающих элементов содержание бария рассчитывается по формуле, аналогичной (7):

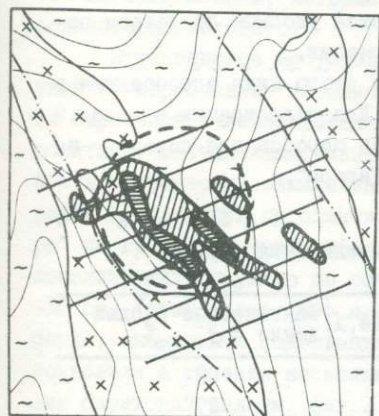
$$C_{Ba} = K_{\frac{1}{N_S}} (N_{Ba} - d_{Ba,s} N_S - d_{Ba})$$

Обозначения соответствуют принятым в выражении (7). Использование этой формулы позволяет также существенно уменьшить влияние изменения эффективного атомного номера горных пород и их плотности, влияние изменения геометрии и неровности поверхности при опробовании пород в условиях естественного залегания. Ввиду того, что энергия рассеянного и аналитического излучения при опробовании на барий (по сравнению с опробованием на сумму цинка, свинца и мышьяка) существенно выше и отношение этих энергий меньше, влияние указанных геометрических факторов уменьшается. Поэтому опробование на барий можно проводить с использованием наиболее простого спо-



Фиг. 24. Спектрограммы вторичного излучения проб при возбуждении источником ^{241}Am

I- проба содержит 0,5% Ва в SiO_2 , регистрация с помощью пропорционального счётчика СПМ-5. II- а/- проба не содержит бария, б/ содержание бария 1%, регистрация сцинтилляционным счётчиком $\text{NaJ}(\text{Tl})$ прибора "Гагара"



Фиг. 25. Геохимическая карта вторичных ореолов рассеяния бария над баритовой залежью

I- сланцы, алевриты, песчаники, известняки, 2- порфиры, 3- тектонические нарушения, 4- контур предполагавшегося ориентировочного положения баритовой залежи, 5- профили РР-опробования, 6- содержания бария 2-5 раз выше фоновых, 7- содержания бария более, чем в 5 раз превышающие фоновые



соба — одиночного зонда. По тем же причинам меньшее влияние оказывает изменение влажности и содержания органического материала в породах.

При измерениях используются стандарты с поверхностной плотностью порядка 2 г/см^2 , обеспечивающие условия измерений в "насыщенном" слое. В качестве фоновых стандартов целесообразно использовать стеклянные или керамические пластины, а также изготовленные с помощью алебаstra. Бариевые стандарты изготавливаются из смеси наполнителя (SiO_2 , CaO и т.д.) и чистых соединений бария. В качестве связующего может использоваться алебастр или цемент. Истинное содержание бария в стандарте определяется химическим анализом проб, взятой из смеси, приготовленной к цементации. Практически для калибровки аппаратуры при измерениях на профиле или для контроля лабораторной аппаратуры можно использовать один бариевый стандарт с содержанием бария порядка 1%.

Примеры использования методики

РР-опробования горных пород на барий

В настоящее время накоплен большой объем сопоставимых материалов по РР-выявлению ореолов рассеяния бария, подтверждающих целесообразность использования такого вида опробования. Ввиду сравнительно простой методики РР-экспресс-опробования на барий, высокой информативности этого элемента для различных типов рудных месторождений, опробование на барий является удобным средством получения оперативной геологической информации.

Особенно эффективно использование этого вида опробования в условиях естественного залегания пород. Для иллюстрации в табл. 9 приведены данные по точности результатов опробования пород на барий, полученные на аппаратуре типа "Гагара".

Т а б л и ц а 9

Относительная погрешность РР-определения бария

Диапазон содержаний, %	Среднее содержание, %	Фактическое расхождение \bar{z} , %
0,02-0,049	0,032	32
0,05-0,099	0,076	27
0,10-0,19	0,153	20
0,20-0,49	0,361	16

Сопоставление результатов РР-опробования с данными химического анализа контрольных проб, отобранных в точках измерения, показывает отсутствие значимых систематических расхождений. При этом

величины относительных расхождений в фоновом диапазоне содержаний бария не превышают $\pm 30-50\%$, а при высоких содержаниях бария (0,2-0,8%) составляют около 10-15%. В значительной степени эти расхождения обусловлены неточным совпадением вещества, проанализированного в условиях естественного залегания и отобранного для химического анализа.

Производительность РР-анализа на барий в силу более простой методики измерений выше, чем при анализе на суммарное содержание цинка, свинца и мышьяка, и может составлять до 150 проб или 100 точек опробования в смену на прибор.

Представляется, что наиболее рационально использование данного метода на этапе крупномасштабных и детальных геохимических исследований с целью выявления и прослеживания по геохимическим аномалиям бария рудных зон и отдельных рудных тел, состав которых предварительно установлен.

В ряде случаев целесообразным с геохимической точки зрения может оказаться использование комплексного РР-опробования горных пород на барий и суммарное содержание цинка, свинца и мышьяка или другие элементы-индикаторы оруденения. Аппаратура, необходимая для такого опробования, может базироваться на РР-анализаторе типа "Гагара" в сочетании с различными блоками детектирования.

Для примера рассмотрим кратко некоторые результаты использования методики опробования пород на барий, полученные при участии тех же организаций, которые были отмечены выше (глава I, примеры использования метода).

Путинцевское месторождение (Рудный Алтай). На одном из участков РР-опробование выполнялось с целью оконтуривания с поверхности баритовой залежи. Вмещающие породы представлены сланцами, алевролитами, песчаниками, известняками, прорванными порфирами. Мощность современных элювиально-делювиальных образований 2-5 м. Измерения выполнялись со сцинтилляционным счетчиком и прибором "Гагара" по профилям, ориентированным вкостр простирания основных рудо-локализирующих структур по сети 100 x 20 м в закопках глубиной 10-30 см. Установлено, что местный геохимический фон составляет 0,05% бария, аномальные содержания - до 1,2% бария. Проведенные работы позволили в течение нескольких дней уточнить площадь распространения баритовой залежи, фиг.25 [24].

На другом участке, по которому уже проводилось РР-опробование на сумму цинка, свинца и мышьяка (см. глава I, примеры использова-

ния метода), было также выполнено опробование на барий. Измерения проводились с целью прослеживания под покровом современных рыхлых образований полиметаллических рудных тел. Установлена тесная корреляция положения участков с аномальными содержаниями бария и суммы Σ , причем ореолы бария (геохимический фон около 0,028%, аномалии до 0,6%) в ряде случаев имеют большую протяженность.

На месторождении Акатуй (Восточное Забайкалье) по результатам РР-анализа отобранных проб керна проводилось изучение первичных ореолов рассеяния бария. Измерения проводились в полевой лаборатории с блоком детектирования на криптоновом счетчике СРМ-5. Пример сопоставимых результатов РР-опробования скважины на барий, стронций и сумму цинка, свинца и мышьяка показан на фиг.16.

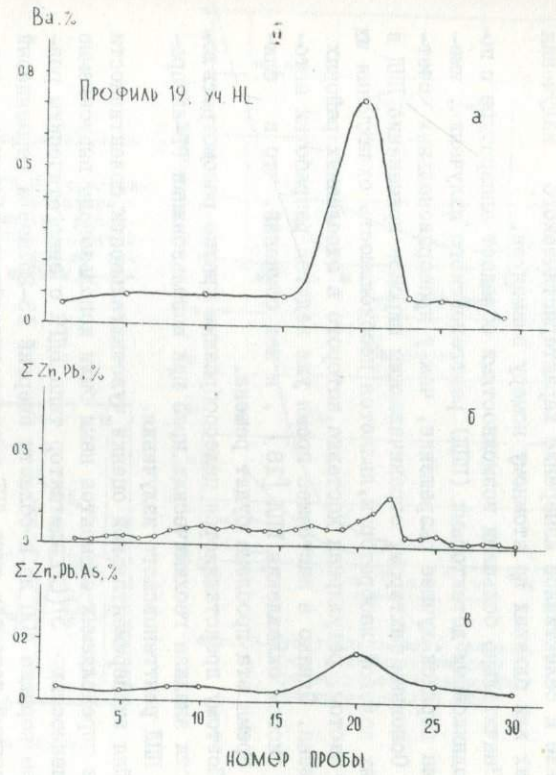
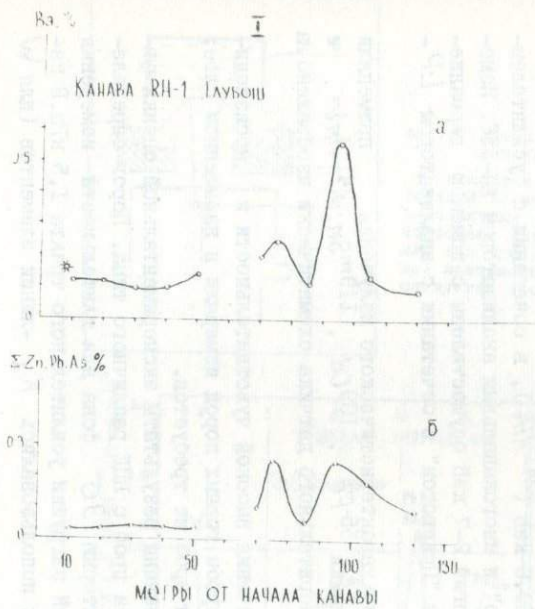
Локальный геохимический фон бария, определенный при анализе проб, отобранных за пределами геохимических аномалий, составил 0,007%, аномальные содержания бария до 0,045%, в дайковых породах среднее содержание бария 0,08%.

Опробование коренных пород на барий проводилось также и по канавам. Сопоставление результатов такого опробования с данными РР-опробования на сумму Σ , полученными на участке Глубош (Пшибрам, Чехословакия), показано на фиг.26. При опробовании на барий коренных пород (фиг.26-I) наблюдается резкое увеличение содержания бария на участках с аномальными содержаниями Σ . Аналогичные результаты получены при анализе на барий проб рыхлых отложений (фиг.26-II).

Таким образом, экспрессная методика РР-опробования горных пород на барий является перспективной и может оказать существенную пользу при изучении различных типов рудных месторождений. Сочетание этого вида опробования с РР-опробованием на сумму Σ или другие элементы дает возможность получения более полной геологической информации.

Глава III. ВОЗМОЖНОСТИ МНОГОЭЛЕМЕНТНОГО АНАЛИЗА ГЕОХИМИЧЕСКИХ ПРОБ

Для оценки перспективности выявленных аномалий необходимы данные о поведении более широкого круга элементов-индикаторов. Очевидно, что оперативное получение такой информации непосредственно на месте проведения поисковых работ позволило бы сократить сроки изучения аномалий и повысить эффективность геологических исследований.



Фиг. 26. Результаты РР-опробования на барии и сумму

I- коренные породы: а- барии, б- сумма ;
 II- рыхлые отложения: а- барии, б- спектральный анализ отобранных проб, в- сумма Σ

Возможности многоэлементного анализа с помощью аппаратуры со сцинтилляционными и пропорциональными счетчиками ограничены из-за недостаточного энергетического разрешения, что затрудняет выделение и селективное измерение характеристического излучения соседних или близких по атомному номеру элементов.

Значительно большими возможностями обладает аппаратура с полупроводниковыми детекторами (ППД) рентгеновского излучения, имеющими на порядок лучшее разрешение, чем у пропорциональных счетчиков. Основным фактором, ограничивающим широкое применение ППД в условиях полевой лаборатории, является необходимость охлаждения их жидким азотом, регулярная доставка которого в отдаленных районах затруднена. Однако в настоящее время уже ведутся разработки автономных систем охлаждения ППД [18], и нет сомнений, что в ближайшее время эта проблема будет решена.

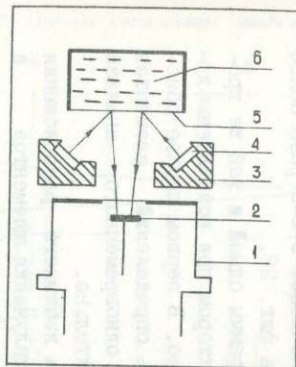
Поэтому представляется целесообразным кратко рассмотреть возможности анализа геохимических проб при использовании РР-аппаратуры с ППД рентгеновского излучения.

Для экспериментальной оценки чувствительности, селективности и круга определяемых элементов нами были использованы выпускаемые промышленностью $Si(Li)$ -детектор типа БДРК с энергетическим разрешением порядка 400 эв в области энергий 15-20 кэВ и германиевый радиационный детектор типа ДГР с энергетическим разрешением около 500 эв по линии 59,6 кэВ (^{241}Am), в сочетании с усилителем-экспандером "Лангур" и многоканальным анализатором АИ-256. Измерения в области энергий 2-7 кэВ осуществлены с помощью германиевого детектора фирмы "Прингстон" в сочетании с анализатором LP-4840.

Для возбуждения характеристического излучения применяли радиоизотопные источники ^{55}Fe , ^{109}Cd , ^{119m}Sn , ^{241}Am и ^{57}Co . Устройство измерительного датчика схематически изображено на фиг.27.

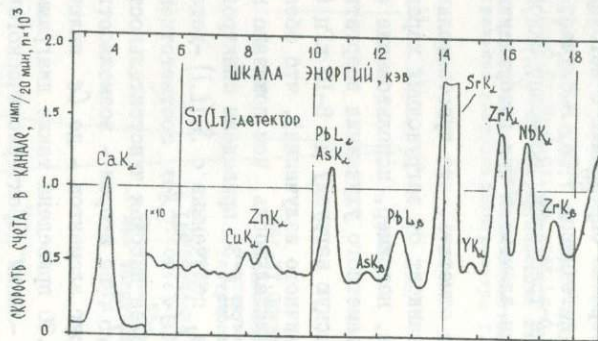
С целью обеспечения высокой чувствительности и производительности анализа, пробы горных пород измеряли в насыщенном слое; при этом взвешивания проб не требуется.

На фиг.28 приведены результаты экспериментальной оценки чувствительности анализа проб с ППД различного типа. Порог определения рассчитан по критерию 3σ фона для длительности измерения 20 мин и интегральной загрузки усилительного тракта 1,5 кГц. В качестве аналитических использовались K_{α} -линии элементов (для W



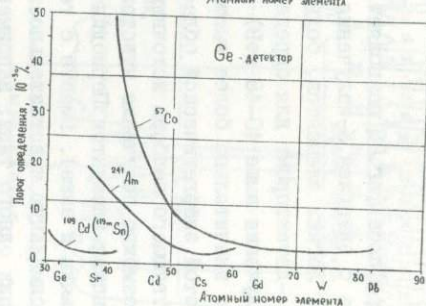
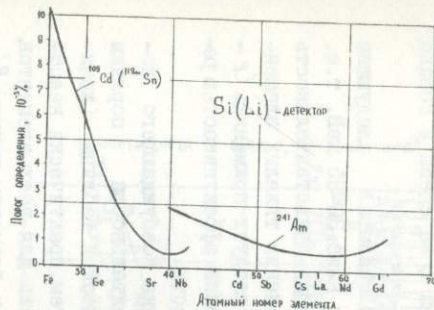
Фиг. 27. Схема измерительного датчика

1- криостат ППД, 2- чувствительный элемент детектора, 3- защитный экран, 4- радиоизотопный источник, 5- контейнер для пробы с дном из тонкой лавсановой плёнки, 6- исследуемая проба



Фиг. 29. Спектрограмма эталонной пробы на основе известняка

Содержание в %: Си-0,03; Zn-0,03; As-0,03; Pb-0,03; Sr-0,03; Y-0,003; Zr-0,01; Nb-0,01. Источник ^{109}Cd активностью 5 мкюри; интегральная нагрузка 1,5 кГц



Фиг. 28. Чувствительность анализа проб в насыщенном слое при импульсной нагрузке спектрометра 1,5 кГц

и более тяжелых элементов - K_{α_i} -линии). Интенсивность аналитических пиков определяли путем суммирования числа импульсов в каналах пика с последующим вычитанием фона под пиком, который находили как среднее арифметическое из величины фона слева и справа от пика.

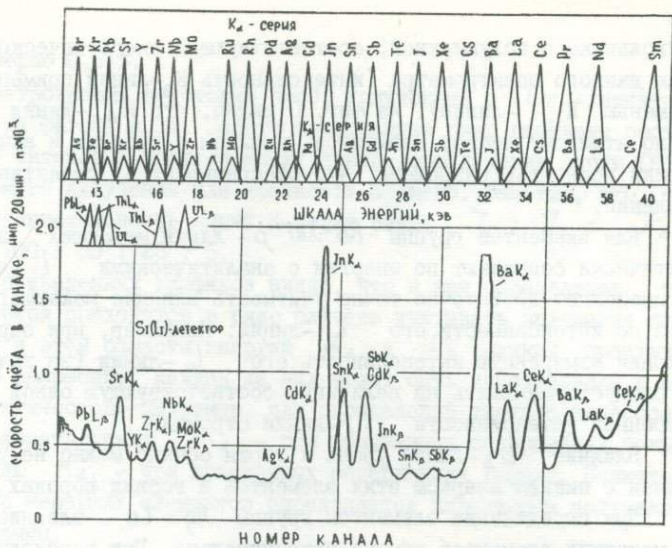
Рассмотрение графиков фиг.28 позволяет сделать следующие выводы. Для элементов с энергией K -излучения ниже 30-35 кэВ, т.е. от $La-Ce$ в сторону легких элементов, большая чувствительность достигается с $Si(Li)$ -детектором; для определения тяжелых элементов (с энергией K -излучения выше 40-45 кэВ) следует применять Ce -детекторы, обладающие значительно более высокой эффективностью регистрации фотонов в этой энергетической области.

Путем соответствующего подбора источника возбуждающего излучения и типа ПЩ возможно получение чувствительности порядка $1+2 \cdot 10^{-3}\%$ для большинства элементов Периодической таблицы (начиная, примерно, с мышьяка и выше). Вместе с тем, практически невозможно обеспечить максимальную чувствительность для всех элементов, используя лишь источник одного типа; например элементы группы $Rb-Nb$ целесообразно определять с источником ^{109}Cd , а элементы Ta, W - с источником ^{57}Co . В случае, когда максимальная чувствительность не требуется, возможно одновременное определение более широкой группы элементов при возбуждении соответствующим источником.

Следует отметить, что чувствительность анализа в определенной степени зависит от загрузочных характеристик усилительной аппаратуры. Так, например, использование анализатора $LP-4840$ позволяет без заметного ухудшения энергетического разрешения увеличить импульсную загрузку до 8-10 кГц (за счет увеличения интенсивности первичного излучения), что обеспечивает в 2-3 раза более высокую чувствительность, чем показано на фиг. 28.

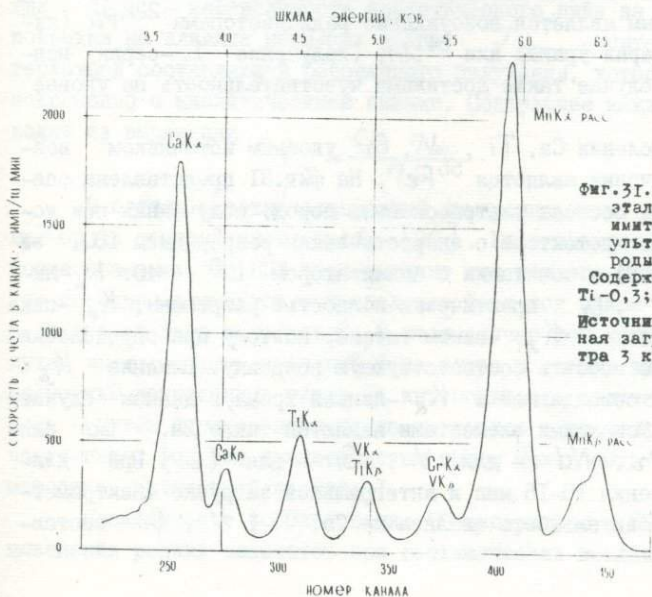
На фиг. 29 и 30 приведены спектрограммы одной и той же пробы известняка, полученные с $Si(Li)$ -детектором при возбуждении источником ^{109}Cd и ^{241}Am соответственно. В первом случае обеспечивается более высокая чувствительность определений элементов от Cu до Nb , во втором - возможность одновременного анализа на широкий круг элементов - до Ce включительно.

На фиг.30 приведена также диаграмма взаимного расположения K_{α} и K_{β} -линий характеристического излучения элементов в рассматриваемой области энергий. Каждая линия изображена в виде



Фиг. 30. Спектрограмма эталонной пробы на основе известняка

Содержание в%: Pb-0,03; Sr-0,03; Y-0,003; Zr-0,01; Nb-0,01; Cd-0,01; Sn-0,01; Sb-0,01; Ba-0,03; La-0,01; Ce-0,01. Пики AgK_{α} и $InK_{\alpha, \beta}$ - от конструктивных материалов детектора. Источник ^{241}Am активностью 90 мкюри, интегральная нагрузка спектрометра 1,5 кгЦ



Фиг. 31. Спектрограмма эталонной пробы, имитирующей состав ультраосновной породы
Содержание в%: Ca-4,5; Ti-0,3; V-0,1; Cr-0,3.
Источник ^{55}Fe . Интегральная нагрузка спектрометра 3 кгЦ

треугольника с полушириной, соответствующей энергетическому разрешению данного спектрометра (интенсивность K_{β} -линий примерно в 5 раз меньше K_{α} -линий). Из фиг.30 видно, что K_{α} -линии соседних по атомному номеру элементов, начиная с рубидия и выше, практически полностью разрешены, что обеспечивает их селективное определение.

Для элементов группы $Rb-Mo$ β -линии мешающих элементов практически совпадают по энергии с аналитическими L -линиями. Это позволяет достаточно точно учитывать влияние мешающего элемента по интенсивности его L -линии. Например, при определении циркония измеренную интенсивность его L -линии (за вычетом фона) следует уменьшить на величину, соответствующую одной пятой измеренной интенсивности L -линии стронция.

Влияние L_{β} -линий урана и тория обычно можно не учитывать в связи с низким кларком этих элементов в горных породах.

При определении элементов группы $Ag-Ce$ влияние K_{β} -линий мешающих элементов обычно незначительно. При необходимости поправки вводятся по результатам измерений K_{α} -линий мешающих элементов.

Для элементов группы Ni, Cu, Zn, Ga, Ge, As источники ^{109}Cd или ^{119m}Sn не являются оптимальными в связи с большой разницей энергий возбуждающего и анализируемого излучения. Более эффективным является возбуждение радиоизотопами ^{238}Pu (излучение L -серии урана) или ^{241}Am (излучение L -серии нептуния). В этом случае также достижима чувствительность на уровне $1+2 \cdot 10^{-3}\%$.

При определении Ca, Ti, V, Cr удобным источником возбуждающего излучения является ^{55}Fe . На фиг.31 представлена спектрограмма пробы состава ультраосновных пород, полученная при использовании Ge -детектора с энергетическим разрешением 180 эВ (по линии 6,4 кэВ) в сочетании с анализатором LP-4840. K_{α} -линии Ca, Ti, V, Cr практически полностью разрешены, K_{α} -пик ванадия совпадает с K_{β} -пиком титана, поэтому при определении V необходимо вносить соответствующую поправку. Влияние K_{β} -линии ванадия, совпадающей с K_{α} -линией хрома, в данном случае незначительно. Мешающими элементами являются также Ba, La для Ti ; Ce, Pr, Nd - для V ; Sm - для Cr . При длительности измерения 10-15 мин и интегральной загрузке спектрометра 3-4 кГц чувствительность анализа на Ca, Ti, V, Cr состав-

ляет примерно 0,01%.

Спектрограммы некоторых проб, полученные с Ge -детектором, показаны на фиг.32 и 33. Зарегистрированные пики помечены соответствующими индексами рентгеновских линий; обозначение серии (K) регистрируемого излучения для краткости опущено. Заметим, что относительная интенсивность линий K-серии равна $\mathcal{J}_{\alpha_1} : \mathcal{J}_{\alpha_2} : \mathcal{J}_{\beta_1} : \mathcal{J}_{\beta_2} = 100 : 50 : 25 : 5$.

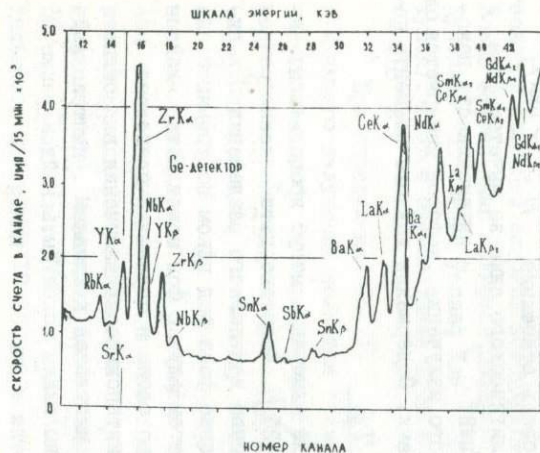
Из приведенных графиков видно, что и при определении тяжелых элементов приходится в ряде случаев учитывать наложение линий, поскольку в этой области энергий α_1 и α_2 -линий практически полностью разрешены, каждая из них может быть использована в качестве аналитической. Например, для определений тантала целесообразно использовать линию K_{α_2} - при повышенных содержаниях вольфрама, и линию K_{α_1} - при повышенных содержаниях гафния. Наличие или отсутствие мешающих элементов определяется характером полученной спектрограммы.

При анализе геохимических проб содержание определяемых элементов обычно не превышает 0,1%. В этом случае учет влияния состава образца с достаточной для практики точностью можно осуществлять по способу спектральных отношений. В качестве аналитического параметра целесообразно использовать отношение $\eta = \frac{\mathcal{J}_{\text{пик}}}{\mathcal{J}_{\text{расс}}}$ где $\mathcal{J}_{\text{пик}}$ - интенсивность аналитического пика за вычетом фона и поправки на влияние мешающих линий; $\mathcal{J}_{\text{расс}}$ - интенсивность некогерентной составляющей рассеянного излучения, которое измеряется одновременно с аналитическими пиками. Содержание каждого элемента находят из выражения

$$C_x = \frac{C_{\text{эт}} \eta_x}{\eta_{\text{эт}}}$$

В случае высоких содержаний измерения могут проводиться, например, "в тонком" слое пробы [26]. Если энергетическое разрешение применяемого ПД недостаточно для полного разделения K_{α} -пигов соседних элементов, определение фона под пиком по уровню слева и справа от пика затруднено. В этом случае фон может быть найден путем интерполяции значений фона слева и справа за пределами полностью разрешенных пиков, а интенсивность излучения в области пика - путем суммирования числа импульсов в каналах центральной части пика. Фон под аналитическим пиком может быть найден также по методике, изложенной в главе I.

Практическое использование РР-аппаратуры с ПД для изучения поведения редких элементов при геохимических исследованиях показало



Фиг. 32. Спектрограмма проб редкометалльного гранита

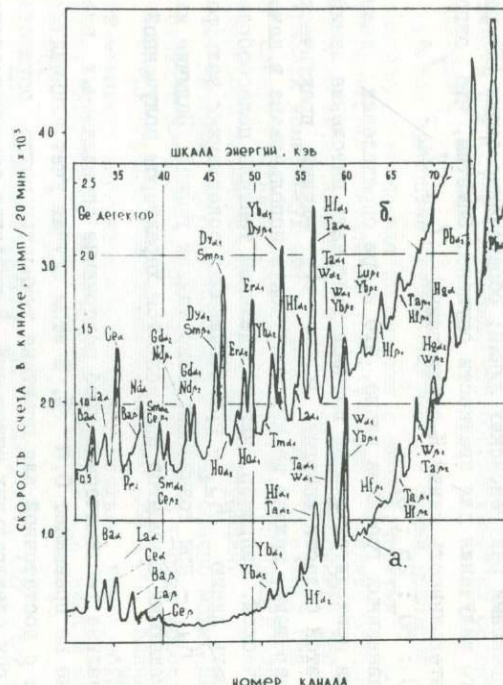
Содержание в %: Rb-0,1; Y-0,3; Zr-1,1, Nb-0,15; Sn-0,04, Ba-0,03; La-0,023; Ce-0,055; Nd-0,021, Sm-0,015, Gd-0,023.

Источник ^{241}Am активностью 90мкКи. Интегральная загрузка спектрометра 2 кГц

Фиг. 33. Спектрограммы проб: эталонной на основе известняка (а), редкометалльного гранита (б)

Содержание в процентах: а) Ba - 0,1, La - 0,03, Ce - 0,08, Yb - 0,01, Hf - 0,01, W - 0,08, Ta - 0,03, Ta - 0,012, W - 0,005.

Hg - 0,01, Pb - 0,1; б) Ba - 0,03, La - 0,023, Ce - 0,055, Nd - 0,021, Sm - 0,015, Gd - 0,023,



Yb - 0,023, Er - 0,08, Yb - 0,023, Hf - 0,031, W - 0,005.

Источник ^{57}Co активностью 0,5 мКи, интегральная загрузка спектрометра 1 кГц

до высокую точность и эффективность метода, возможность проведения группового экспресс-анализа геохимических проб в условиях полевой лаборатории [13].

Для примера в табл.10 приведены результаты экспериментальной оценки точности определений ряда элементов в пробах нефелинового сиенита. Величина среднеквадратичной погрешности рассчитана по данным анализа 20 различных проб в двух параллельных навесках.

Таблица 10

Точность группового анализа проб нефелинового сиенита

Элемент	Диапазон содержаний, %	Относительная среднеквадратичная погрешность, %
Sr	0,007-0,1	8,3
Zr	0,01 -0,2	9,2
Nb	0,01 -0,25	8,0
Ta	0,003-0,03	10,1
Ce	0,005-0,05	7,9
La	$5 \cdot 10^{-3}$ - $5 \cdot 10^{-2}$	15,5

Внешний контроль химическим и рентгеноспектральным методами показал отсутствие значимых систематических расхождений. Производительность группового анализа на 5-7 элементов достигает 200-250 элементопределений в смену на один прибор.

ЛИТЕРАТУРА

1. Большаков А.Ю. Рентгенорадиометрический метод исследования состава горных пород. Атомиздат, М., 1970.
2. Гасинас С.Ю., Коваленко В.В. Применение рентгенорадиометрического метода при поисках и оценке вольфрамовых руд. -Тезисы докладов к совещанию по геохимическим методам поисков олова, вольфрама и ртути. Владивосток, 1975, с.232-233.
3. Геохимические методы поисков рудных месторождений (Инструкция). "Недра", М., 1965.
4. Горн Л.С., Хазанов Б.И. Избирательные радиометры. Атомиздат, М., 1975.
5. Григорян С.В. Эндогенные ореолы рассеяния химических элементов вокруг свинцово-цинковых рудных тел. В сб." Эндогенные

ореолы рассеяния некоторых гидротермальных месторождений". Гостехиздат, М., 1963.

6. Григорян С.В. Геохимические методы при поисках эндогенных рудных месторождений. Методические рекомендации. М., 1974.

7. Жохов Г.А., Климов В.И. Применение рентгенорадиометрического метода при поисково-разведочных работах на золото-рудных месторождениях Узбекистана. - Тезисы докладов Междуведомственного совещания по методике и технике геохимических поисков рудных месторождений. "ИЛИМ", Фрунзе, 1975, с.415-417.

8. Жохов Г.А., Цой Р.В., Климов В.И. и др. Рентгенорадиометрический метод поисков и оценки месторождений золота. - Разведка и охрана недр, 1976, № II, с.39-43.

9. Зайцев Е.И. Ядерно-физические методы при геохимических поисках. Тезисы докладов Междуведомственного совещания по методике и технике геохимических поисков рудных месторождений. "ИЛИМ", Фрунзе, 1975.

10. Зайцев Е.И., Мильчаков В.И. Экспресс-анализ геохимических проб на некоторые элементы-индикаторы. - Тезисы докладов Междуведомственного совещания по геохимическим поискам. Ереван, 1974, с.45-46.

11. Зайцев Е.И., Мильчаков В.И. Опыт использования рентгенорадиометрического анализа при геохимических поисках. - Экспресс-информация ВИЭМС. Геологические методы поисков и разведки месторождений металлических полезных ископаемых. М., 1975, № 7.

12. Зайцев Е.И., Мильчаков В.И. Применение рентгенорадиометрического метода при геохимических поисках. - Заводская лаборатория, 1976, т.42, № 6, с.686.

13. Зайцев Е.И., Марголин Е.М., Поляца О.П. и др. Рентгенорадиометрический анализ геохимических проб на редкие элементы с использованием германий-литиевого детектора. - Аналитическая химия, т. XXIX, вып.4, 1974, с.668-673.

14. Кохов Е.Д., Мильчаков В.И., Щекин К.И. Выбор пропорциональных счетчиков для рентгенорадиометрического анализа на основе расчета их аппаратного спектра. В сб. "Радиационная техника". Атомиздат, М., 1973, вып.9, с.252.

15. Кохов Е.Д., Мильчаков В.И., Щекин К.И. О влиянии установки уровней дискриминации на точность рентгенорадиометрического анализа. В сб. "Радиационная техника". Атомиздат, М., 1974, вып.10, с.217.

16. Кохов Е.Д., Мильчаков В.И., Щекин К.И. Влияние нестабильности аппаратуры на точность рентгенорадиометрического анализа. В сб. "Радиационная техника", Атомиздат, М., 1974, вып.10, с. 210.
17. Леман Е.П. Рентгенорадиометрический метод опробования месторождений цветных и редких металлов. "Недра", М., 1973.
18. Мамиконян С.В. Аппаратура и методы флуоресцентного рентгенорадиометрического анализа. Атомиздат, М., 1976.
19. Мильчаков В.И. Некоторые возможности рентгенорадиометрического анализа при геохимических поисках. Тезисы докладов Всесоюзной научно-технической конференции "Новые методы поисков, изучения и оценки месторождений полезных ископаемых". Изд. ИМГРЭ, М., 1975, с.74-75.
20. Митов В.Н., Боголюбов А.Н. Определение группы халькофильных элементов радиоизотопным рентгеноспектральным методом при литохимических поисках. В сб. "Методы разведочной геофизики". Ядерная геофизика в рудной геологии. Л., Изд. ВИРГ, 1975, вып.25, с. 101-104.
21. Овчинников Л.Н., Григорян С.В. Закономерности состава и строения первичных геохимических ореолов сульфидных месторождений. В сб. "Научные основы геохимических методов поисков глубокозалегающих м-ний". Иркутск, 1970.
22. Панькин В.В. Малощумящий предусилитель на полевом транзисторе для пропорциональных счетчиков рентгеновского излучения. В сб. "Радиационная техника". Атомиздат, М., 1974, вып.10, с.207.
23. Плотников Р.И., Пшеничный Г.А. Флуоресцентный рентгенорадиометрический анализ. Атомиздат, М., 1973.
24. Соколов Л.С., Иванов Г.К. Рентгенорадиометрический анализ на барий горных пород в их естественном залегании при геохимических поисках. Методические рекомендации. Под ред. Е.И.Зайцева. Изд. ИМГРЭ, М., 1975.
25. Томский И.В., Горев А.В. Рентгенорадиометрический метод при поисках оловянно-полиметаллических руд в Приморье. - Разведка и охрана недр, 1976, № 3, с.37-41.
26. Якубович А.Л., Зайцев Е.И., Пржиялговский С.М. Ядерно-физические методы анализа минерального сырья. Атомиздат, М., 1973.

СО Д Е Р Ж А Н И Е

В в е д е н и е	3
Г л а в а I. Выявление аномалий суммы цинка, свинца, мышьяка и других элементов	4
Условия измерений и аппаратура	4
Учет фона под аналитическими линиями	10
Определение суммарного содержания элементов	14
Подготовка проб к анализу	17
Особенности применения метода для опробования горных пород в их естественном залегании	18
Примеры использования метода	25
Г л а в а II. Выявление аномальных содержаний бария	41
Условия измерений	41
Методика измерения и подготовка стандартов	42
Примеры использования методики РФ-опробования горных пород на барий	44
Г л а в а III. Возможности многоэлементного анализа геохимических проб	46
Л и т е р а т у р а	55

**ВЫЯВЛЕНИЕ ЛИТОГЕОХИМИЧЕСКИХ АНОМАЛИЙ
РЕНТГЕНРАДИОМЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ**

Утверждено к печати
Институтом минералогии, геохимии
и кристаллохимии редких элементов

Редакторы: Т.И.Нефелова, О.А.Новиков

Подписано к печати 31 января 1978 г.
Т-02821. Тираж 400. 4 л. Цена 28 коп.
Формат 60x108 1/16. Заказ № 18

Ротапринт ИМГРЭ

28 коп

2892