

## МЕТОДИКА ИДЕНТИФИКАЦИИ ФОРМАЦИОННОГО ТИПА ЛИТОГЕОХИМИЧЕСКИХ АНОМАЛИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ БАЙЕСОВСКОЙ СТАТИСТИКИ

© 2004 г. С. В. Григорян\*, А. Е. Оганесян\*, А. З. Адамян\*\*

\*<sup>\*</sup> Институт геологических наук НАН РА  
375019, Ереван, пр. Маршала Баграмяна, 24а, Республика Армения  
E-mail: hrshah@sci.am

\*\*<sup>\*</sup> Центр эколого-ноосферных исследований НАН РА  
375025, Ереван, ул. Абовяна, 68, Республика Армения  
ecocenter@rambler.ru, ecocenter@sci.am  
Поступила в редакцию 22.09.2004 г.

В результате обработки результатов литогеохимического опробования различных формационных типов эталонных рудных месторождений с применением Байесовской статистики разработана методика идентификации по единичным пробам формационной принадлежности литогеохимических аномалий (как вторичных, так и первичных). Проверка эффективности разработанного способа по ряду аномалий показала его высокую надежность. Преимуществом предложенной методики по сравнению с существующими является возможность идентификации аномалий по единичным пробам с ограниченным числом элементов-индикаторов (до 3-4), что резко расширяет сферы ее практического применения.

Известно, что в настоящее время в связи с истощением фонда выходящих на поверхность месторождений (в большинстве стран он полностью исчерпан), скрытые на глубине месторождения (слепые, погребенные и слабо проявленные на поверхности) остаются единственным резервом прироста запасов минерального сырья. По этой причине в настоящее время основным направлением научных исследований в области поисков минеральных месторождений являются разработка и внедрение в производство геологоразведочных работ эффективных методов поисков и оценки скрытых месторождений. Опыт последних лет убедительно показывает, что в решении этой проблемы наиболее эффективными являются геохимические методы и, прежде всего, литогеохимические, основанные на результатах опробования коренных пород, а также почв и почвообразующих рыхлых отложений.

Опыт геохимических поисков показывает, что одной из наиболее сложных задач поисков скрытого оруденения является определение рудно-формационной принадлежности выявленных при геохимическом опробовании геохимических аномалий, особенно в пределах закрытых площадей, где рудовмещающие породы перекрыты рыхлыми отложениями различной мощности. Для решения этой задачи предложен критерий горизонтальной зональности (Григорян, 1987), однако его применение имеет ряд ограничений, поэтому усилия в разработке более эффективных критериев продолжаются.

В настоящей статье описывается новая методика определения формационной принадлежности литогеохимических аномалий, основанная на применении при обработке результатов анализа геохимических проб Байесовской статистики.

Байесовский метод, как показано в работе (Григорян, Ляхович, 2000), является одним из перспективных способов решения проблемы идентификации формационной принадлежности геохимических аномалий. В этой работе описан способ отнесения исследуемой аномалии к оп-

ределенному формационному типу золоторудных месторождений по результатам изучения состава элементов-примесей в рудных минералах.

Рассмотрим принцип такого подхода при определении формационной принадлежности геохимических аномалий по типоморфным элементам-индикаторам.

Пусть число равновероятных несовместимых событий  $A$  (под событием понимают принадлежность аномалии к месторождению определенного генетического типа) в рассматриваемом множестве  $\Omega$  формаций равно  $m$ . Каждый анализируемый объект (в данном случае геохимическая аномалия) характеризуется  $n$  признаками (содержание элементов-индикаторов), и эти признаки приняли значения:  $x_1 = x_1^0, x_2 = x_2^0, \dots, x_n = x_n^0$ . Тогда вероятность того, что при наличии данного набора признаков  $K_i = (x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0)$  аномалия принадлежит  $i$ -тому классу ( $i$ -ой формационной группе месторождений), т.е. реализуется событие  $A_i$ , будет определена по формуле Байеса:

$$P(A_i | K_i) = \frac{P(A_i) f_i(x_1^0 \dots x_n^0)}{\sum_{i=1}^m P(A_i) f_i(x_1^0 \dots x_n^0)}$$

Значения  $P(A_i) f_i(x_1^0 \dots x_n^0)$  находятся в соответствии с правилами расчета сложной вероятности, как:

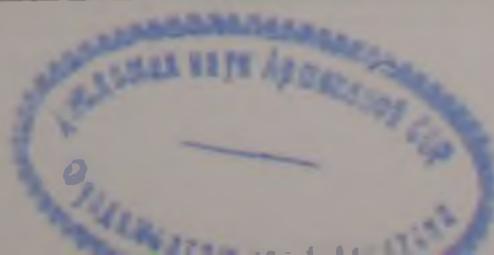
$$P(A_i) f_i(x_1^0 \dots x_n^0) = \prod_{i=1}^n P(A_i) f_i(x_1^0 \dots x_n^0)$$

Таким образом, поставленная задача решается на основе сравнения априорных вероятностей распределения в геохимических аномалиях ранее измеренных признаков, в данном случае содержания химических элементов-индикаторов в геохимических аномалиях эталонных по формационной принадлежности месторождений, с апостериорными вероятностями, полученными измерением этих признаков в опознаваемой геохимической аномалии.

Основные методические требования при фор-

Априорные вероятности содержаний элементов (z/m)

Формации	Интервал группирования содержаний элементов															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
<b>Ni</b>																
I								1.6	13.6	61	18.7	5	0.1			
II						1.5	46.4	9.1	30.6	12.4						
III								28.7	68.8	2	0.5					
IV							1.6	18.3	38.3	39.2	2.5	0.3				
V					86.8	12.6	0.5									
VI			4.8	24.5	31.6	2										
VII							13	39	7.8	36.4	3.9					
VIII						6.2	54.2	20.9	6.2	9.9	1.8	0.7				
IX										12	60.6	21	6			
X									34.3	51.1	14.5		0.8			
XI										2.1	96.5	1.3				
XII			15.2	69.6		13	2.2									
XIII								7.3	36.4	24.5	31	0.9				
<b>Co</b>																
I								18	45.4	34.7	1.8	0.1				
II									6.8	81	12.1					
III							29.4	55.4	15.2							
IV							9.4	14.9	29.8	41.7	4.2					
V				57.9	41.6	0.5										
VI			15.2	71.7	7.1											
VII								13.9	74.7	11.4						
VIII							1.4	26	68.5	4						
IX										41.8	47.2	10.9				
X							9.3	27.1	38	23.2	2.3					
XI									4.3	52.6	42.7	0.4				
XII				65.3	22.4	12.2										
XIII									82.4	15.7	0.9	0.9				
<b>Cu</b>																
I								0.6	4.9	10.5	20.7	52.1	10.7	0.5		
II										0.4	4.6	31	55.3	8.8		
III									4	7	11	20	36	20	2	
IV										11.5	54.2	25.3	7.4	1.6		
V					9.6	27.8	49	13.1	0.5							
VI		16.7	21.9	10.9	16	12.4	14.5	5.8	1.5							
VII						2.5	1.3	15	26.3	28.8	22.5	3.7				
VIII									6.5	5.8	12.7	21	29.4	23.2	1.4	
IX											40	15.1	14	17.2	12.5	
X									2.4	9.6	36	20.8	10.4	3.2		
XI										1.7	46.5	23.5	24.3	3.9		
XII			24.5	43.4	17	13.2	1.9									
XIII									3.7	19.4	68.5	8.3				
<b>Mo</b>																
I							15.1	42.4	31.6	8.6	2.1	0.2				
II										11	43	26.6	19.5			
III										1.9	20.1	23.5	31.9	18.6	3.9	
IV							27.9	28.3	25.8	10.6	6.4	0.7	0.3			
V			15.9	50.3	27	5.3		1.6								
VI		25.8	31.5	15.7	7.9	15.7	2.2	1.1								
VII								6.3	41.8	38	11.4	2.5				
VIII								3.6	36.2	42	16.7	1.5				
IX								23.9	31.6	17	20.4	4.5	2.3			
X							26.7	45.8	20.6	3.8	3					
XI							8.3	64.5	24.6	1.7	0.4		0.4			
XII	83.3	16.7														
XIII							8.2	16.5	56.9	14.6	3.7					



	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
<b>Pb</b>																
I								0,13	16,5	66,9	14,5	1,4	0,26	0,13		
II							14,2	44,3	33,6	4,7	1,6	0,8	0,8			
III							1,5	40,4	46,3	10,8	0,5	0,5				
IV										34,1	48,5	13,5	3,2	0,3	0,3	
V				42,3	43,9	1,6										
VI		4,3		37	56	5,2	0,9	0,9								
VII									39,7	47,4	5,1	6,4	1,3			
VIII						0,7	27,6	54	14	2,6	1,1					
IX									15,4	73,6	7,7	3,3				
X										21	37,1	16,1	12,9	5,6	2,4	4,8
XI										5,2	55,6	24,3	13	0,9	0,4	0,4
XII			72,4	20,7		6,9										
XIII										14,8	52,8	31,5	0,9			
<b>Zn</b>																
I									0,37	1,87	51,7	45,4	0,2	0,1	0,2	
II							20	46,5	26,9	5,3	0,4	0,8				
III									81,2	14,7	4,1					
IV										6,7	68,2	23,5	1,6			
V			29,8	62,8	5,8	1	0,5									
VI		2,1	51,1	34	8,5	4,2										
VII									7,5	76,3	12,5	3,7				
VIII									1,1	7,7	64	23,5	3,3	0,4		
IX									1,1	62,5	31,8	4,5				
X					9,3	25,6	31	22,5	4,6	0,8	6,2					
XI									51,7	44,8	3	0,4				
XII			66,7	28,9	4,5											
XIII										10,2	37	34,3	18,5			
<b>Ag</b>																
I					75	10,2	12,1	1,9	0,7							
II						0,8	25,3	58	13,6	2,3						
III							1,5	23,5	30,6	41,3	2,5	0,5				
IV								39,7	31,8	22,3	4,3	1,6				
V	85,9	9,2	4,9													
VI	52,2	43,5	4,4													
VII						60,3	16,7	17,9	5,1							
VIII						73,5	10	14,3	2,2							
IX							40,2	18,1	28,5	9,2	3,4					
X					1,5	23,7	25,2	20,6	5,3	11,4	7,6	4,6				
XI					12,1	28,3	47,1	10,1	1,6							
XII	28,6	42,9	28,6													
XIII				63,9	26,4	6,4	2,7	0,9	0,9							

Интервалы содержаний элементов (г/т) 1 0,0003-0,001; 2 0,001-0,003; 3 0,003-0,01; 4 0,01-0,03; 5 0,03-0,1; 6 0,1-0,3; 7 0,3-1; 8 1-3; 9 3-10; 10 10-30; 11 30-100; 12 100-300; 13 300-1000; 14 1000-3000; 15 3000-10000; 16 10000-30000

Типы формаций

- I – Медно-молибденовый (Cu-Mo) Каджаран, почвы  
 II – Медно-молибденовый (Cu-Mo) Каджаран, буровые скважины  
 III – Медно-молибденовый (Cu-Mo) Сунгун (Иран), буровые скважины  
 IV – Медно-молибденовый (Cu-Mo) Сунгун (Иран), почвы  
 V – Медно-молибденовый (Cu-Mo) Джиндара, буровые скважины  
 VI – Медно-молибденовый (Cu-Mo) Агарак, почвы  
 VII – Медно-молибденовый (Cu-Mo) Шадан 1, поверхность, коренные породы  
 VIII – Медно-молибденовый (Cu-Mo) Шадан 2, поверхность, коренные породы  
 IX – Скарново-медный (Ск-Cu) Анджерд (Иран), буровые скважины  
 X – Жильный свинцово-цинковый (Pb-Zn) Рашидабад (Иран), почвы  
 XI – Кварц-золоторудный (Кв-Au) Харвана (Иран), почвы  
 XII – Золото-полиметаллический (Au-п-м) Тей-Личквас, почвы  
 XIII – Нефтегазовый (нефть) Карачаганак (Казахстан), почвы

мировании априорных вероятностей согласно Байесовскому подходу – статистическая представительность выборок, на основании которой оцениваются значения априорной вероятности данного признака, а также вероятность формационной идентификации объектов, на которых создается массив эталонных признаков.

Для реализации процедуры распознавания образа необходимо располагать адекватными решаемой задаче эталонами, представляющими собой априорные модели, разработанные на основе предварительного моделирования по определенному признаку конкретных объектов; в нашем случае это особенности распределения элементов-индикаторов в геохимических аномалиях различных формационных типов месторождений-эталонов.

В качестве априорных геохимических моделей различных формационных типов были использованы собранные авторами анализы почв и коренных пород в пределах месторождений различных формационных типов, обобщенные в форме приведенных в табл.1 частостей распределения содержаний элементов-индикаторов. Последние и представляют собой априорные вероятности распределения элементов-индикаторов в геохимических аномалиях эталонных месторождений.

Приведенные в табл.1 априорные вероятности содержаний элементов формационных типов месторождений являются типоморфными для Армении и Ирана – стран, характеризующихся сход-

ными металлогеническими особенностями.

В табл.1 приведено только ограниченное число элементов-индикаторов Ni, Co, Cu, Mo, Pb, Zn, Ag, поскольку использованные для составления таблицы геохимические аномалии были исследованы на разные числа элементов, и по этой причине только приведенные выше 7 элементов оказались "сквозными" для исследованных эталонных месторождений. Очевидно, чем больше элементов, тем выше надежность методики, откуда следует один из наиболее эффективных путей дальнейшего совершенствования рассматриваемой методики: этот путь – использование при составлении таблицы априорных вероятностей возможно максимально большего числа элементов-индикаторов. Однако, как показал опыт, несмотря на ограниченное число элементов в эталонной таблице идентификация формационной принадлежности литогеохимических аномалий во всех случаях оказалась верной (было выполнено 5 испытаний).

Для иллюстрации практической реализации описанной выше методики в идентификации формационных литогеохимических аномалий ниже рассматриваются 2 примера определения формационной принадлежности различных геохимических аномалий из пяти выполненных испытаний, причем все они были осуществлены одной пробой, отобранной из подлежащей идентификации аномалии.

Аномалия Сонаджил была выявлена в Ахарском районе северо-западного Ирана в резуль-

Таблица 2

Апостериорные вероятности идентификации формационного типа аномалии Сонаджил (проба С-3)

NN	Формационные типы	Апостериорные вероятности элементов							Произв. апостериорных вероятностей	Вероятность идентификации (%)
		Ni	Co	Cu	Mi	Ag	Pb	Zn		
I	Cu-Mo. Каджаран, почвы.	0,016	0,454	0,010	0,021	0,121	0,145	0,454	0,00000000	0,530
II	Cu-Mo. Каджаран, буровые скважины.	0,031	0,068	0,010	0,430	0,253	0,016	0,008	0,00000000	0,013
III	Cu-Mo. Сунгун (Иран), буровые скважины.	0,287	0,152	0,020	0,201	0,015	0,005	0,010	0,00000000	0,006
IV	Cu-Mo. Сунгун (Иран), почвы.	0,183	0,298	0,010	0,064	0,397	0,485	0,235	0,0000016	68,824
V	Cu-Mo. Джиндара, буровые скважины.	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,00000000	0,000
VI	Cu-Mo. Агарак, почвы.	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,00000000	0,000
VII	Cu-Mo. Шадан 1, поверхность, коренные породы.	0,390	0,747	0,010	0,114	0,167	0,050	0,125	0,0000003	15,107
VIII	Cu-Mo. Шадан 2, поверхность, коренные породы.	0,209	0,685	0,014	0,167	0,100	0,010	0,640	0,0000002	9,336
IX	Скарн.-Cu. Анджерд (Иран), буровые скважины.	0,010	0,010	0,125	0,204	0,402	0,080	0,318	0,00000000	1,137
X	Pb-Zn. Рашидабад (Иран), почвы.	0,010	0,380	0,010	0,030	0,252	0,370	0,062	0,00000000	0,287
XI	Кварц-Au. Харвана (Иран), почвы.	0,010	0,043	0,010	0,004	0,471	0,560	0,004	0,00000000	0,001
XII	Au-полим. Тей-Личквас, почвы.	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,00000000	0,000
XIII	Нефть. Карачаганак (Казахстан), почвы.	0,073	0,824	0,010	0,037	0,027	0,530	0,343	0,0000001	4,761
Сумма (I-XIII)									0,0000002	100

тате среднемасштабного геохимического опробования почв (сеть 200×200 м) на площади, где коренные рудовмещающие породы были перекрыты почвообразующими автохтонными отложениями различной мощности (до 2 м). Для идентификации формационной принадлежности этой аномалии по рассматриваемой методике была использована проба С-3, отобранная из эпицентра аномалии. Из приведенных в табл. 2 данных однозначно следует медно-молибденовый тип выявленной аномалии с вероятностью 68,8% (эталон медно-молибденовое месторождение Сунгун). Примечательно, что остальные по значимости вероятности (15,1% и 9,3%) также установлены для медно-молибденовых эталонов (Шадан 1, 2, табл. 2). С учетом этого общая вероятность принадлежности испытываемой аномалии медно-молибденовому формационному типу составит более 93,2%.

На основании полученных результатов аномалия Сонаджил была признана принадлежащей медно-молибденовому промышленно-ценному формационному типу и была рекомендована к оценке. Прежде всего была использована количественно-единая вертикальная геохимическая зональность для оценки уровня эрозионного среза испытываемой аномалии (Григорян, 1999). Был установлен благоприятный эрозионный срез, который послужил основанием для буровой проверки аномалии. К настоящему времени на участке пробурена одна скважина, которая вскрыла медно-молибденовые руды, подтвердив тем самым как правильность идентификации медно-молибденовой природы аномалии, так и его благоприятный эрозионный срез.

Исследования показывают, что приведенная выше таблица априорных вероятностей эталонных геохимических аномалий, выявленных в результате детального литогеохимического опробования (обычно 100×20 м), с успехом может

быть использована также для идентификации формационного типа геохимических аномалий, выявленных в результате регионального опробования донных осадков. Для иллюстрации этого положения в табл. 3 приведены результаты расчетов, выполненных по анализам пробы донных осадков N4001, отобранной в результате регионального опробования в масштабе 1:100000 с плотностью опробования 1 проба на 5 км<sup>2</sup>. Проба отобрана из аномалии заведомо медно-молибденовой природы (фиксируют потоки рассеяния известного медно-молибденового рудопроявления). Как следует из данных табл. 3, испытываемая проба с вероятностью 50,7% относится к медно-молибденовому типу оруденения месторождения Каджаран и с 28,5% – месторождения Сунгун того же формационного типа. Таким образом принадлежность испытываемой пробы N4001 медно-молибденовому типу минерализации весьма высока и равняется 50,7+28,5=79,2%.

В заключение следует обратить внимание на то обстоятельство, что этот весьма положительный и обнадеживающий для широкого практического применения результат получен при использовании весьма ограниченного числа элементов-индикаторов – всего четырех, поскольку были использованы результаты ранее выполненного мелкомасштабного опробования донных осадков и анализов отобранных проб на весьма ограниченный набор элементов-индикаторов (всего 4 элемента). Это означает, что практическое значение описанной выше методики надежной идентификации формационных типов месторождений резко возрастает, поскольку она с успехом может быть использована не только для интерпретации результатов геохимического опробования, выполненного в соответствии с требованиями "Инструкции по геохимическим поискам рудных месторождений" (Григорян и др.

Таблица 3  
Апостериорные вероятности идентификации формационного типа аномалии в донных осадках (проба N4001, район Варзаган, Иран)

NN	Формационные типы	Апостериорные вероятности элементов				Произв. апостериорных вероятностей	Вероятность идентификации (%)
		Cu	Mo	Ag	Zn		
I	Cu-Mo Каджаран, почвы	0,521	0,424	0,145	0,454	0,015	50,734
II	Cu-Mo Каджаран, буровые скважины	0,310	0,010	0,016	0,008	0,000	0,001
III	Cu-Mo Сунгун (Иран), буровые скважины	0,200	0,010	0,005	0,010	0,000	0,000
IV	Cu-Mo Сунгун (Иран), почвы	0,253	0,283	0,485	0,235	0,008	28,470
V	Cu-Mo Джиндара, буровые скважины	0,010	0,016	0,010	0,010	0,000	0,000
VI	Cu-Mo Агарак, почвы	0,010	0,001	0,010	0,010	0,000	0,000
VII	Cu-Mo Шадан 1, поверхность, коренные породы	0,037	0,063	0,051	0,125	0,000	0,052
VIII	Cu-Mo Шадан 2, поверхность, коренные породы	0,210	0,036	0,011	0,640	0,000	0,186
IX	Скарн -Cu Анджерд (Иран), буровые скважины	0,151	0,239	0,077	0,318	0,001	3,083
X	Pb-Zn Рашидабад (Иран), почвы	0,208	0,458	0,371	0,062	0,002	7,645
XI	Кварц-Ау Харвана (Иран), почвы	0,235	0,645	0,556	0,004	0,000	1,176
XII	Ау-полим Тей-Личквас, почвы	0,010	0,010	0,010	0,010	0,000	0,000
XIII	Нефть Карачаганак (Казахстан), почвы	0,083	0,165	0,528	0,343	0,002	8,653
Сумма (I- XIII)						0,029	100

1983), но и результатов менее качественных геохимических съемок прежних лет, выполненных с существенными нарушениями инструктивных требований.

## ЛИТЕРАТУРА

Бочаров П.П., Печинкин А.В. Теория вероятностей. Математическая статистика. М.: Изд. "Гардарика", 1998, 328 с.  
Григорян С.В. Рудничная геохимия. М.: Недра, 1992,

294 с.

Григорян С.В. О количественно-единой геохимической зональности первичных ореолов. Сб. "Прогностно-поисковая геохимия на рубеже XXI века". М.: Изд. ИМГРЭ, 1929, 52-55 с.  
Григорян С.В., Соловов А.П., Кузин М.Ф. Инструкция по геохимическим поискам рудных месторождений. М.: Недра, 1983, с.192.  
Григорян С.В., Ляхович Т.Т. Оценка геохимических аномалий по элементам-примесям в минералах. Методические рекомендации. М.: Изд. ИМГРЭ, 2000, 118 с.

## ԼԻԹՈՆԵՐԿՐԱՔԻՄԻԱԿԱՆ ԱՆՈՄԱԼԻԱՆԵՐԻ ՖՈՐՄԱՑԻՈՆ ՏԻՊԻ ԻՎԵՆՏԻՖԻԿԱՑԻԱՅԻ ՄԵԹՈԴԻԿԱՆ ԲԱՅԵՍՈՎՅԱՆ ՎԻՃԱԿԱԳՐՈՒԹՅԱՆ ԿԻՐԱՌՈՒՄԸ

Ս. Վ. Գրիգորյան, Ա. Ե. Հովհաննիսյան, Ա. Չ. Ադամյան

### Ա մ փ ո փ ու մ

Տարբեր ֆորմացիոն տիպի էտալոնային հանքավայրերի համար լիթոերկրաքիմիական նմուշարկման տվյալների (արմատական ապարներ և հողեր) մշակման արդյունքում (Բայեսովյան վիճակագրության կիրառմամբ) ստացվել է լիթոերկրաքիմիական անոմալիաների ֆորմացիոն պատկանելիության իդենտիֆիկացիայի մեթոդ՝ սահմանափակ քանակով նմուշներով (ինչպես երկրորդական, այնպես էլ՝ առաջնային): Ստացված մեթոդի էֆեկտիվության ստուգումը մի շարք անոմալիաներով ցույց է տվել դրա բարձր հուսալիությունը: Այս մեթոդի առավելությունը մյուս՝ գոյություն ունեցող մեթոդների նկատմամբ, անոմալիաների իդենտիֆիկացիայի հնարավորությունն է միասնական նմուշներով, սահմանափակ թվով էլեմենտ-ինդիկատորների համար (3-4 էլեմենտ), որը կտրուկ մեծացնում է դրա պրակտիկ կիրառման հնարավորությունը:

## A TECHNIQUE OF FORMATIONAL TYPE IDENTIFICATION FOR LITHO-GEOCHEMICAL ANOMALIES WITH APPLICATION OF BAYESIAN STATISTICS

S. V. Grigoryan, A. E. Hovhannissyan, A. Z. Adamyan

### A b s t r a c t

Processing of results of litho-geochemical sampling of soils and base rocks from diverse formational types of standard ore deposits with application of Bayesian statistics helped to develop a technique of identification by single samples of formational belonging of litho-geochemical anomalies (both secondary, and primary ones.) For a number of anomalies, efficiency of the proposed technique proved to be highly reliable. The advantage of the suggested technique compared to the existing ones is that it is possible to identify anomalies by single samples given a limited number of indicator-elements (up to 3-4), a feature that drastically extends the range of its application in practice.