

ЛОГИКО-ИНФОРМАЦИОННЫЕ МОДЕЛИ ДЛЯ ПРОГНОЗА И ЭКСПРЕСС-ОЦЕНКИ НОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЗОЛОТА В АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЕ РОССИИ

И. А. Чижова, К. В. Лобанов, А. В. Волков

ФГБУН Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН (Москва, Российская Федерация)

Статья поступила в редакцию 1 марта 2019 г.

Подготовлены логико-информационные модели, основанные на репрезентативной аналитической базе данных по 95 месторождениям и рудопроявлениям золота северо-востока России. Модели рассчитаны для пяти формационных типов месторождений: Au-Ag-эпитермального; Au-кварцевого; Au-сульфидного (вкрапленных руд); Cu-Mo-Au-порфирового; колчеданно-полиметаллического, обогащенного Au и Ag. Разработаны правила, позволяющие надежно идентифицировать формационный тип новых объектов (43 ошибки из 289 проб, качество распознавания – 0,85). Показано, что созданные модели могут быть использованы для экспресс-оценки новых рудопоявлений золота в Арктической зоне России.

Ключевые слова: Арктическая зона, золото, месторождения, логико-информационная модель, база данных, рудно-формационный тип, микроэлементы, прогноз, экспресс-оценка.

Введение

В развитых странах в последние десятилетия разрабатываются новые подходы и новые технологии прогнозирования и поисков месторождений благородных металлов, основанные на новейших методах анализа состава и свойств минерального вещества. Изучение современными методами руд позволяет существенно уточнить прогнозно-оценочные модели месторождений золота разных минеральных типов.

Расширение минерально-сырьевой базы золота — неперемное условие устойчивого развития и экономической безопасности России и особенно ее северо-восточных арктических регионов [1]. При выборе перспективных площадей для постановки геолого-разведочных работ наиболее важная задача — определение рудноформационного типа оруденения. Отметим, что масштаб месторождения можно прогнозировать по его формационному типу (табл. 1).

Таким образом, правильное определение формационного типа нового объекта позволит выбрать направление, предложить эффективную методику дальнейших геолого-разведочных работ и в конечном счете уменьшить сроки их проведения и финансовые затраты.

Для рудообразующих систем, распространенных на северо-востоке России, установлены различные формационные типы месторождений золота, от-

личающиеся друг от друга индикаторным набором микроэлементов [2].

Логико-информационное моделирование на базе машинного обучения позволяет выделить множество информативных признаков с указанием их разделяющих весов и диапазонов изменения значений (интервалов-индикаторов), типичных для месторождений золота конкретного формационного типа.

Методика исследований

При прогнозно-металлогенетическом анализе перспективных площадей наиболее актуальными задачами являются определение рудноформационного типа месторождений и оценка их масштаба. Для решения этих задач в автоматизированном виде на компьютере предусмотрен следующий алгоритм: постановка геологической задачи, формализация задачи, выбор метода решения, проверка условия его применимости, подготовка геологического материала к компьютерному анализу, разработка целевых баз данных, применение метода, интерпретация результата (модели), построение экспертных систем для решения задачи на базе полученных расчетов, апробация системы. Основные принципы для построения распознающих систем — принцип общности свойств (тип 1) и принцип перечисления (тип 2) [3; 4].

Принцип общности свойств основан на предположении, что объекты, образующие один класс, обладают

Таблица 1. Масштаб и формационные типы рудных месторождений золота

Масштаб месторождений	Запасы, т	Формационный тип				
		Au-Ag	Au-Q	Au-Sf	Cu-Mo-Au	Pb-Zn-Au-Ag
Мелкие	Менее 25					
Средние	25—100					
Крупные	100—400					
Уникальные	Более 1000					

Примечание. Au-Ag — Au-Ag-эпитермальный; Au-Q — Au-кварцевый; Au-Sf — Au-сульфидный (вкрапленных руд); Cu-Mo-Au — Cu-Mo-Au-порфировый; Pb-Zn-Au-Ag — колчеданно-полиметаллический, обогащенный Au и Ag. Интенсивность цвета показывает частоту встречаемости месторождений данного масштаба.

свойством подобия, отраженного в их характеристиках. Необходимо выделить системы информативных признаков, описывающих группу объектов в целом (отождествляющие признаки) и каждый тип в отдельности (делящие признаки), и на их основе построить решающее правило для отнесения экспертируемого объекта к одному из выделенных типов объектов.

В случае применения принципа перечисления используется некоторая мера сходства для определения степени близости экспертируемого объекта к одному из эталонов. При этом возможен выбор аналога экспертируемого объекта среди эталонных объектов, содержащихся в базе данных, по любому набору признаков, что дает пользователю возможность проверять различные ги-

потезы и сравнивать эффективность работы выбранных критериев.

Предполагается формирование интеллектуальной гибридной экспертной системы для экспресс-оценки анализируемой перспективной площади [5]. В такую систему целесообразно включить четыре основных взаимосвязанных блока (рис. 1): (1) информационно-аналитический, (2) интеллектуально-графический, (3) блок экспертного выбора ближайшего аналога, (4) блок формирования результатов.

Блок 1 обеспечивает дружественный интерфейс с пользователем (ведение диалога) и визуализацию исходной информации по целевым параметрам из базы данных на основе ГИС-технологии (в графической форме).

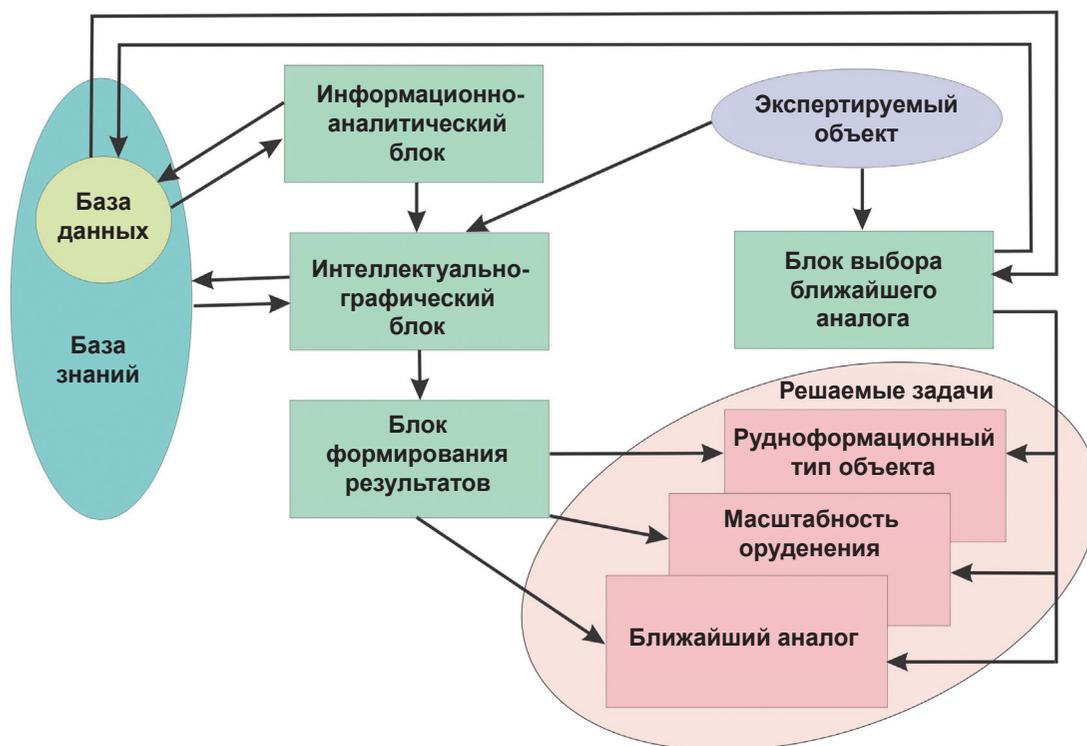


Рис. 1. Схема процесса функционирования интеллектуальной экспертной системы для прогнозной экспресс-оценки перспективных площадей

Fig. 1. Diagram of the functioning process of the intellectual expert system for predictive rapid assessment of promising areas

Блок 2 на основе технологии искусственного интеллекта обеспечивает работу системы принятия решений для получения заключений о формационном типе, масштабности оруденения и выборе ближайшего аналога для экспертируемого объекта по имеющейся базе знаний, содержащей базу данных.

Блок 3 на основе выбранных пользователем информативных признаков или меры близости проводит поиск ближайшего аналога.

Блок 4 является блоком формирования результатов и оценки их достоверности и обеспечивает на основе ГИС-технологии визуализацию полученных заключений.

Экспертная система предназначена для помощи эксперту в оценке потенциала перспективных площадей. Опыт разработки экспертных систем показал, что наилучшим образом поставленным целям отвечают модели решающих правил. Они могут быть построены как на основе знаний экспертов, так и в результате математической обработки имеющейся базы данных по эталонным объектам (эвристические и расчетно-логические правила).

В настоящее время наиболее передовыми технологиями анализа фактических данных и повышения уровня принятия решений являются искусственный интеллект (Artificial Intelligence), особенно наука о данных и машинное обучение (Machine Learning), и большие данные (Big Data), обеспечивающие получение улучшенных результатов. Искусственный интеллект может обрабатывать колоссальные объемы информации, анализировать множество факторов и формировать прогнозы. Для получения значимых результатов данные должны быть организованы, и для них подбирается соответствующая технология обработки.

Логико-информационный анализ

В настоящей работе использовался логико-информационный анализ данных, разработанный в Институте геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии (ИГЕМ) РАН [6], начало которому было положено в работах Р. М. Константинова [7]. Этот метод по современной классификации можно отнести к методам машинного обучения, поскольку модели и решающие правила получаются на основе компьютерного анализа эталонной выборки из базы данных геохимических характеристик проб (52 элемента): Li, Be, P, Sc, Ti, V, Cr, Mn, Co, Ni, Zn, Ga, As, Se, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Ag, Cd, In, Sn, Sb, Te, Cs, Ba, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Hf, Ta, W, Tl, Pb, Bi, Th, U, Au, Cu и коллекции образцов руд (366 образцов) по 95 месторождениям и рудопроявлениям золота северо-востока России различных рудноформационных типов (рис. 2) [8; 9]. По всем пробам получены результаты анализов (AAS, ICP-MS и РФА), выполненные в аналитической лаборатории ИГЕМ РАН.

Процедура математической обработки данных по эталонным и контрольным месторождениям включала следующие этапы [6]:

1. Выделение интервалов-индикаторов из диапазона изменения значений признаков (элементов), характерных для проб с эталонных месторождений каждой группы (выделенной по рудноформационному типу), значения из которого с максимальной вероятностью встречаются на пробах из конкретной группы и не встречаются на пробах из других групп.

2. Выделение информативных признаков, характерных для образцов изучаемых групп месторождений, на основе вычисления функции информативности.

3. Оценка разделяющих способностей информативных признаков на основе вычисления разделяющих весов информативных признаков.

4. Формирование решающих правил для идентификации образцов на основе вычисления функций принадлежности объекта (пробы) к группе (весов объекта), равных сумме разделяющих весов признаков, информативных для данной группы и присутствующих в пробе. Принимается решение: объект относится к той группе, для которой функция принадлежности принимает максимальное значение.

5. Проверка работоспособности решающих правил на основе качества распознавания эталонной и контрольной выборок.

Алгоритмы расчета функций информативности признаков, разделяющих весов информативных признаков, функций принадлежности объекта (пробы) к группе описаны в [6]. Они используются для построения решающего правила для идентификации объектов (см. п. 4). В результате имеем вектор значений функций принадлежности $\varphi_k(X)$ анализируемого объекта X для каждой группы A_k , который характеризует степень сходства этого объекта с анализируемыми группами.

Указанные функции изменяются в диапазоне $[0, 1]$, что позволяет с их помощью легко сравнивать информативность признаков (элементов) и оценивать степень принадлежности. Чем ближе значение функции $\varphi_k(X)$ к единице, тем объект X более сходен с объектами группы A_k .

Если для всех величин $k = 1, 2, \dots, M$ (M — число групп) $\varphi_k(X)$ близко к нулю, то это доказывает несходство объекта с заданными группами и, следовательно, его принадлежность к другой группе, не участвующей в анализе.

Метод позволяет классифицировать каждую пробу и определить ее вероятную принадлежность к той или иной группе, выделенной по рудноформационному типу. На основании проведенной логико-информационной обработки был идентифицирован каждый образец базы данных и определена в целом специфичность каждой группы согласно выделенным интервалам-индикаторам признаков (элементов). На основании полученных оценок (функций принадлежности объекта (пробы) к группе) принимается решение о принадлежности изучаемых объектов к конкретной группе.

Математическая обработка данных позволила нам построить логико-информационные модели на



Рис. 2. Размещение золоторудных месторождений из базы данных
Fig. 2. Location of gold deposits from the database

базе машинного обучения (выделить множество информативных признаков (элементов) с указанием их разделяющих весов и диапазонов изменения их значений (интервалов-индикаторов), типичных для каждой из групп месторождений различных формационных типов).

Результаты анализа

Сравнительный анализ золоторудных месторождений по геохимическим данным заключался в выявлении особенностей следующих формационных

типов, распространенных на северо-востоке России (рис. 2) [9]: (1) Au-Ag-эпиптермального; (2) Au-кварцевого; (3) Au-сульфидного (вкрапленных руд); (4) Cu-Mo-Au-порфирирового; (5) колчеданно-полиметаллического, обогащенного Au и Ag.

В результате расчета получены элементные логико-информационные модели для каждой формации как наборы из 52 признаков-элементов с весами в диапазоне от 0 до 1 (табл. 2) и диапазонов изменения их значений (интервалов-индикаторов), сравнение которых представлено на рис. 3–5. Для

Таблица 2. Информативные признаки (элементы) для типизации золоторудных месторождений

№ п/п	Элемент	Формационный тип					Содержание, г/т	
		Au-Ag	Au-Q	Au-Sf	Cu-Mo-Au	Pb-Zn-Au-Ag	Минимум	Максимум
1	Li	0,024	0,019	0,014	0,026	0	0,05	332
2	Be	0,022	0,02	0,012	0,015	0,028	0	1076
3	P	0,014	0,017	0	0,012	0,024	0,05	5881
4	Sc	0,017	0,018	0,034	0,015	0,013	0	137
5	Ti	0,021	0,021	0,019	0,015	0,023	0,05	17165
6	V	0,016	0,019	0,019	0,02	0,015	0,02	418
7	Cr	0,019	0,018	0,018	0,014	0	0,05	711

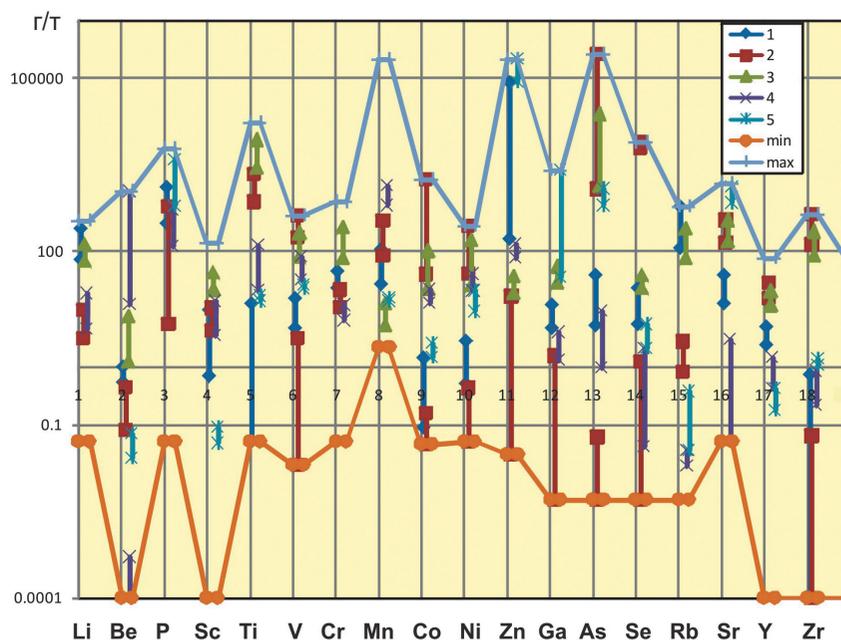
Продолжение табл. 2

№ п/п	Элемент	Формационный тип					Содержание, г/т	
		Au-Ag	Au-Q	Au-Sf	Cu-Mo-Au	Pb-Zn-Au-Ag	Минимум	Максимум
8	Mn	0,018	0,018	0,015	0,014	0,02	2,2	212433
9	Co	0,027	0,018	0,021	0,015	0,015	0,046	1751
10	Ni	0,028	0,015	0,017	0,022	0,011	0,05	278
11	Zn	0,028	0,02	0,019	0,016	0,032	0,03	210927
12	Ga	0,022	0,017	0,013	0,019	0,025	0,005	2481
13	As	0,024	0,028	0,017	0,032	0,019	0,005	256623
14	Se	0,022	0,014	0,039	0,011	0,016	0,005	7601
15	Rb	0,02	0,023	0,013	0,018	0,015	0,005	592
16	Sr	0,028	0,018	0,015	0,021	0,022	0,05	1515
17	Y	0,014	0,02	0,015	0,016	0,018	0	77
18	Zr	0,022	0,02	0,022	0,016	0,023	0	443
19	Nb	0,017	0,022	0,024	0,023	0,018	0	59,5
20	Mo	0,016	0,028	0,025	0,023	0,032	0,01	5262
21	Ag	0,027	0,015	0,031	0,034	0,024	0,005	1780
22	Cd	0,023	0,024	0,02	0,019	0,032	0	1070
23	In	0,017	0,02	0,023	0,019	0,023	0	1681
24	Sn	0,019	0,019	0,027	0,023	0,015	0	307,4197
25	Sb	0,03	0,021	0,031	0,028	0,022	0,004	452276
26	Te	0,02	0,026	0,018	0,035	0,011	0,001	386283
27	Cs	0,022	0,017	0,018	0,021	0,024	0	36
28	Ba	0,016	0,021	0,014	0,02	0,024	0,05	51987
29	La	0,024	0,014	0,027	0,017	0,021	0	76
30	Ce	0,019	0,017	0,018	0,014	0,019	0,005	143
31	Pr	0,016	0,017	0,018	0,013	0,013	0,005	16
32	Nd	0,015	0,015	0,017	0,012	0,016	0,004	53
33	Sm	0,015	0,016	0,018	0,017	0,024	0,001	13
34	Eu	0,017	0,013	0,019	0,017	0,023	0	17
35	Gd	0,018	0,016	0,018	0,016	0,025	0,007	15
36	Tb	0,015	0,015	0,018	0,021	0,016	0	3,2
37	Dy	0,015	0,018	0,018	0,019	0,02	0	19
38	Ho	0,014	0,018	0,017	0,023	0,02	0	3,4
39	Er	0,013	0,021	0,018	0,018	0,015	0	8,2
40	Tm	0,014	0,018	0,018	0,02	0,015	0	0,92
41	Yb	0,014	0,019	0,018	0,017	0,014	0	4,4
42	Lu	0,015	0,02	0,017	0,018	0,016	0	0,68131

№ п/п	Элемент	Формационный тип					Содержание, г/т	
		Au-Ag	Au-Q	Au-Sf	Cu-Mo-Au	Pb-Zn-Au-Ag	Минимум	Максимум
43	Hf	0,015	0,018	0,021	0,018	0,017	0	10
44	Ta	0,015	0,017	0,024	0,02	0,016	0	2,13
45	W	0,02	0,017	0,02	0,017	0,014	0,013	14387
46	Tl	0,018	0,027	0,018	0,02	0,017	0,0005	38
47	Pb	0,022	0,018	0,015	0,023	0,031	0	284339
48	Bi	0,022	0,02	0,012	0,013	0,025	0	22626
49	Th	0,016	0,017	0,018	0,017	0,018	0	30
50	U	0,021	0,016	0,016	0,022	0,021	0	145
51	Au	0,019	0,022	0,02	0,018	0,016	0,032	8523
52	Cu	0,016	0,034	0,026	0,028	0,024	0,01	75440

Примечание. Цветом выделены наиболее информативные (с наивысшими разделяющими весами) элементы для определения формационного типа.

Рис. 3. Элементные интервалы-индикаторы для типизации золоторудных месторождений (элементы 1–18). Min и max – соответственно минимальные и максимальные значения элементов по выборке, 1–5 – формационные типы месторождений Fig. 3. Elemental interval indicators for the typification of gold deposits (Elements 1–18). Min and max correspond to the minimum and maximum values of the elements in the sample, respectively. 1–5 – formation types of deposits



каждого элемента на этих рисунках выделены характерные диапазоны изменения его значений в пределах изучаемых рудных формаций. Например, для Be наименьшие (0—0,0005 г/т) и наибольшие (12—1076 г/т) значения характерны для типа 4. Далее в порядке увеличения значений располагаются следующие интервалы (см. рис. 3): значения 0,0255—0,0695 г/т характерны для типа 5, значения 0,0815—0,435 г/т — для типа 2, значения 0,545—0,985 г/т — для типа 1, значения 1,25—7,35 г/т — для типа 3. Таким образом, вариационный ряд формационных типов по элементу Be от минимальных до максимальных значений: 4-5-2-1-3-4.

Вариационные ряды формационных типов можно получить для любых элементов, приведенных на рис. 3—5. Для элемента Ag (см. рис. 4) наименьшие (0,005—0,021 г/т) и наибольшие (225,5—1780 г/т) значения характерны для типа 1, значения 0,0215—0,995 г/т — для типа 3, значения 0,685—1,85 г/т — для типа 2, значения (1,05—2,95 г/т) — для типа 4, значения (78,5—225,5 г/т — для типа 5. Вариационный ряд формационных типов по элементу Ag от минимальных значений до максимальных: 1-3-2-4-5-1.

Для элемента Cu (см. рис. 5) наименьшие значения (0,01—5,05 г/т) характерны для типа 2, значения 22,5—61,895 г/т — для типа 3, значения 79,29—

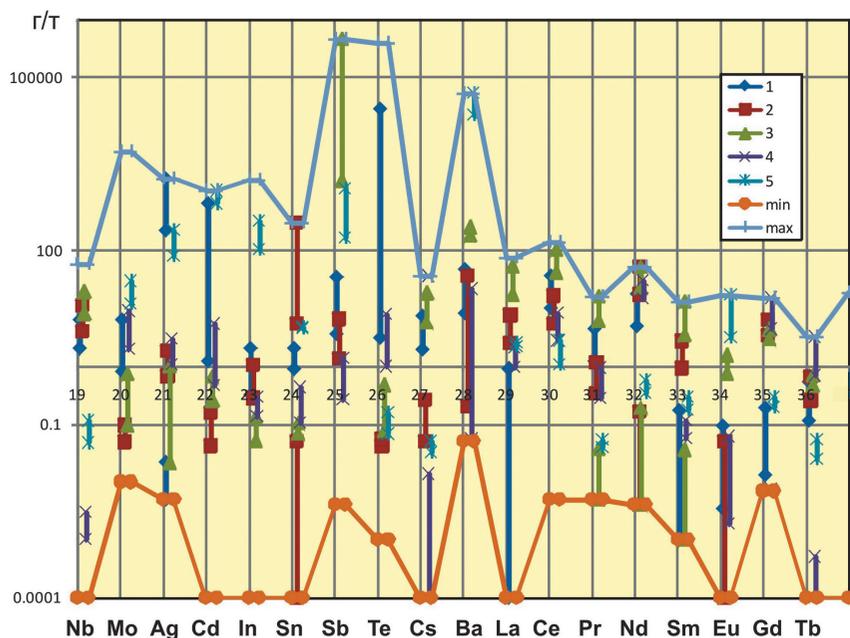


Рис. 4. Элементные интервалы-индикаторы для типизации золоторудных месторождений (элементы 19–36). Min и max – см. подпись к рис. 3

Fig. 4. Elemental interval indicators for the typification of gold deposits (Elements 19–36). Min и max – see the caption for Fig. 3

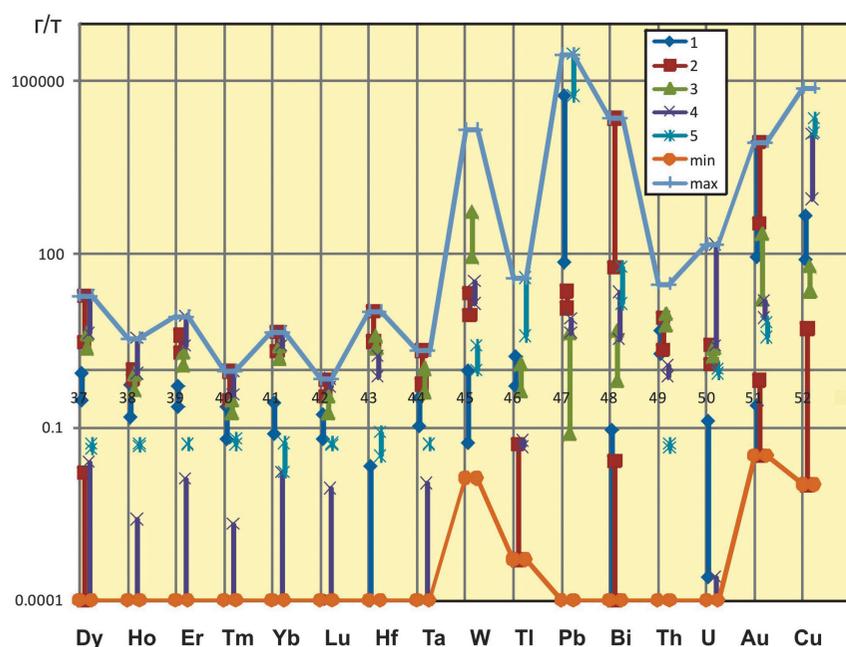


Рис. 5. Элементные интервалы-индикаторы для типизации золоторудных месторождений (элементы 37–52). Min и max – см. подпись к рис. 3

Fig. 5. Elemental interval indicators for the typification of gold deposits (Elements 37–52). Min и max – see the caption for Fig. 3

460 г/т — для типа 1, значения 875—11 915 г/т — для типа 4, значения 12 494—21 856,32 г/т — для типа 5. Вариационный ряд формационных типов по элементу Cu от минимальных значений до максимальных: 2-3-1-4-5.

Такой анализ позволил для характеристики различных формационных типов по степени значимости (разделяющему весу) выделить пять групп элементов: 1 — Ni, Zn, Sr, Sb; 2 — As, Mo, Cu; 3 — Sc, Se, Ag, Sb; 4 — As, Ag, Sb, Te, Cu; 5 — Be, Zn, Mo, Cd, Pb (см. табл. 2). Каждая группа наилучшим образом характеризует свой формационный тип. При использовании для каждого типа соответственно по 146, 89, 30, 19, 5 объектов в таблице обучения получены правила, позволившие надежно идентифи-

цировать пробы (43 ошибки из 289 проб, качество распознавания — 0,85).

Экспресс-оценка новых проявлений золота

Логико-информационные модели (далее — модели) можно использовать для экспресс-оценки новых проявлений золота перспективных площадей Арктической зоны. Для определения формационного типа нового рудопроявления по штуфным пробам¹

¹ Штуфное опробование применяется при обнаружении одиночных обломков рудоносных горных пород, жил или их свалов, развалов, скоплений в аллювии, среди других типов горных пород или рыхлых отложений оцениваемого рудопроявления.

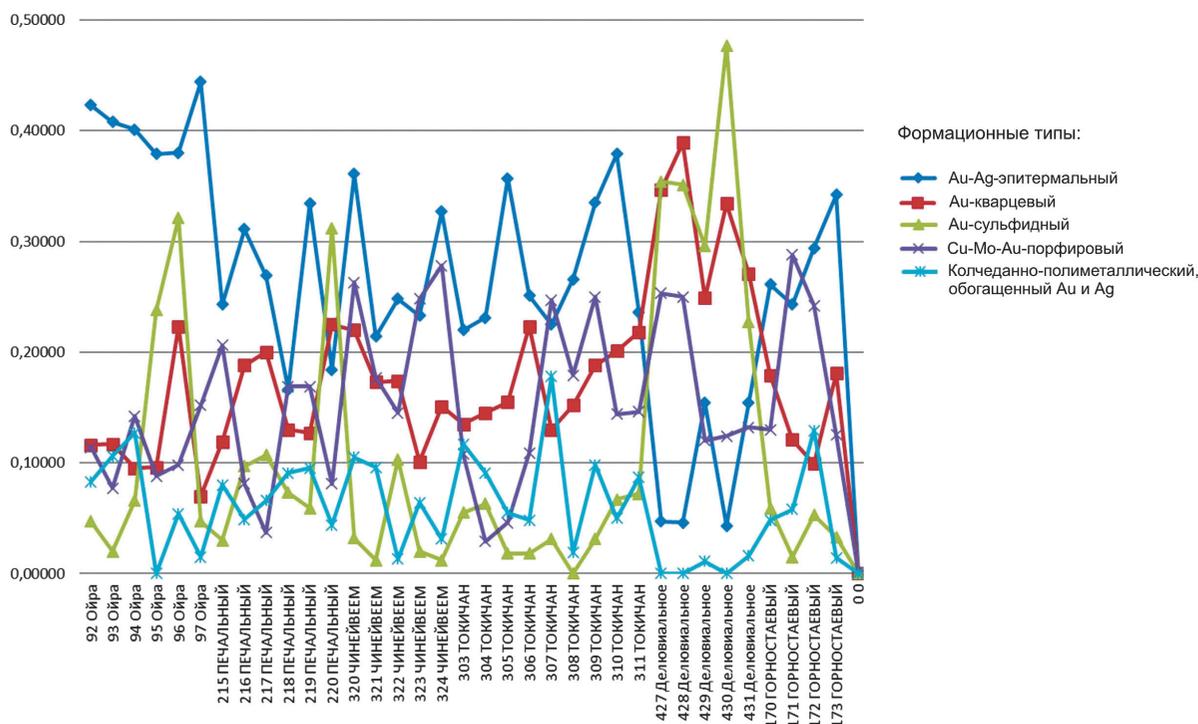


Рис. 6. Результат автоматизированной типизации золоторудных месторождений
 Fig. 6. Result of automated typification of gold deposits

необходимо рассчитать значение функции принадлежности проб к анализируемым группам эталонов как суммарный вес индикаторных данных проб последовательно для каждой модели (суммируются разделяющие веса (см. табл. 2) тех элементов, для которых значение в пробе попадает в интервал-индикатор соответствующего формационного типа — см. рис. 3—5). Оцениваемый новый объект относится к тому формационному типу, для которого суммарный вес индикаторных данных будет иметь максимальное значение среди всех вычисленных суммарных весов по каждому рудоформационному типу.

Рассмотрим применение моделей для определения формационного типа золоторудных объектов: Ойра (6 проб), Печальное (6 проб), Чинейвеем (5 проб), Токичан 9 проб), Делювиальное (5 проб), Горностаево (4 пробы).

Рудопроявления Ойра, Чинейвеем и Горностаево расположены в Охотско-Чукотском вулканоплутоническом поясе, последние два — в Арктической зоне (Центральная Чукотка) (см. рис. 2). Краткое описание рудопроявлений Ойра, Токичан и Чинейвеем приведено в базе данных проекта «Электронная Земля» [10]. Рудопроявление Печальное приурочено к Хурчан-Оротуканской зоне тектономагматической активизации [11]. Проявления Токичан и Делювиальное локализованы в терригенных толщах Яно-Колымского складчатого пояса, Делювиальное — в Арктической зоне, на северо-востоке Якутии (см. рис. 2).

На рис. 6 и в табл. 3 представлены результаты компьютерной экспресс-оценки перечисленных

выше рудопроявлений с использованием разработанных моделей (см. табл. 2, рис. 3—5). Все объекты кроме Делювиального получили наибольший вес (значение функции принадлежности, вычисленное по сумме разделяющих весов соответствующего типа из табл. 2 для значений элементов, попавших в интервалы-индикаторы, выделенные для этого типа, — см. рис. 3—5), указывающий на первый формационный тип (Au-Ag-эпитермальный), что соответствует оценке экспертов-геологов. На графике (рис. 6) соответственно отображены все вычисленные значения функции принадлежности проб для каждого типа. Над всеми линиями доминирует линия, соответствующая Au-Ag-эпитермальному типу. Ближайшие эталонные аналоги по коэффициенту сходства ² (более 0,940) — также месторождения первого формационного типа (см. табл. 3). Для токичанских проб кроме первого типа (Au-Ag-эпитермального) отмечены также высокие веса (см. рис. 6), указывающие на наличие второго формационного типа (Au-кварцевый), что подтверждает оценку экспертов-геологов. Пробы Делювиального проявления характеризуются весами двух формационных типов: второго (Au-кварцевого) и третьего (Au-сульфидного) (см. рис. 6), что позволяет поновому оценить его масштаб как, возможно, крупного объекта (см. табл. 1). Ближайшие эталонные аналоги Делювиального по коэффициенту сходства

² В работе использовалась мера сходства Говера [12], характеризующая степень похожести проб по значениям функций принадлежности изученным рудоформационным типам.

Таблица 3. Ближайшие аналоги для объектов оценки

№ п/п	Объект оценки	Аналоги по коэффициенту сходства	Формационный тип и масштаб аналога
1	Ойра	Кубака (0,956), Аметистовое (0,954)	Au-Ag-эпитермальный, крупные
2	Печальный	Магнитный (0,966), Ольча (0,965)	Au-Ag-эпитермальный, мелкие
3	Чинейвеем	Эргувеем (0,968), Теплое (0,945)	Au-Ag-эпитермальный, мелкие
4	Токичан	Биркачан (0,960), Пепенвеем (0,950), Южное Бургали (0,950)	Au-Ag-эпитермальный, средние
5	Горностаевый	Джультета (0,971), Биркачан (0,956)	Au-Ag-эпитермальный, средние
6	Делювиальный	Дражное (0,965), Хугланнах (0,922)	Au-кварцевый, средние

Примечание. В скобках указан коэффициент сходства с эталоном значений функции принадлежности проанализированных формационных типов для оцениваемого объекта.

(0,965 и 0,922) — месторождения второго формационного типа.

Из табл. 1 следует, что закономерности изменения масштабов месторождений прослеживаются в пределах одного формационного типа. Поэтому после оценки формационного типа по методу аналогии по ближайшим аналогам возможно прогнозирование масштабов оруденения. Масштабы эталонных месторождений аналогов (см. табл. 3) в основном не противоречат прогнозной оценке новых объектов за исключением месторождения Ойра, которое в базе данных отнесено к мелким объектам. Однако следует отметить, что мелким считалось ранее и месторождение Двойное, запасы которого в последние годы были значительно увеличены (до крупных) в связи с открытием новых и доразведкой известных рудных тел [13]. Результаты компьютерного моделирования позволяют рекомендовать продолжить изучение месторождения Ойра.

Заключение

В результате проведенных исследований подготовлены логико-информационные модели, основанные на репрезентативной базе аналитических данных по эталонным месторождениям золота северо-востока России. Это позволяет использовать модели при изучении и оценке новых золоторудных объектов, в том числе и в Арктической зоне России.

Модели рассчитаны для пяти формационных типов месторождений золота: Au-Ag-эпитермального; Au-кварцевого; Au-сульфидного (вкрапленных руд); Cu-Mo-Au-порфирирового; колчеданно-полиметаллического, обогащенного Au и Ag. Разработаны правила, позволяющие надежно идентифицировать формационный тип новых объектов (43 ошибки из 289 проб, качество распознавания — 0,85).

В дальнейшем предполагается продолжить работы по автоматизации процесса идентификации новых золоторудных объектов (определение подтипов

для каждого формационного типа месторождений). Кроме того, планируется создать логико-информационные модели для формационных типов месторождений олова и вольфрама, меди и молибдена, свинца и цинка.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ проекта (грант № 18-05-70001) «Изучение геологических и геодинамических обстановок формирования крупных месторождений стратегических металлов Арктической зоны России: выводы для прогнозирования и поисков новых месторождений».

Литература

1. Волков А. В., Галямов А. Л., Лобанов К. В. Минеральное богатство Циркумарктического пояса // Арктика: экономика и экология. — 2019. — № 1 (33). — С. 106—117. — DOI: 10.25283/2223-4594-2019-1-106-117.
2. Волков А. В., Сидоров А. А., Савва Н. Е. и др. Геохимические особенности вулканогенного рудообразования в северо-западном сегменте Тихоокеанского рудного пояса // Вулканология и сейсмология. — 2017. — № 6. — С. 3—20. — DOI: 10.7868/S0203030617060013.
3. Tou J., Gonzalez R. Pattern recognition Principles / Addison-Wesley Publ. Company. — [S. l.], 1974. — 377 p. — ISBN 9780201075861.
4. Waterman D. A guide to expert systems / Addison-Wesley Publ. Company. — [S. l.], 1986. — 419 p.
5. Chizhova I., Volkov A. Hybrid expert system for prediction and prospecting of gold ore deposits in the Arctic zone // 17th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2017, www.sgem.org, SGEM2017 Conference Proceedings, June 29 — July 05, 2017, Albena, Bulgaria. — Vol. 17: Informatics, Geoinformatics and Remote Sensing, Iss. 21. — P. 351—358. — ISBN 978-619-7408-01-0; ISSN 1314-2704. — DOI: 10.5593/sgem2017/21/S07.045.

Изучение и освоение природных ресурсов Арктики

6. Чижова И. А. Логико-информационное моделирование при прогнозно-металлогеническом анализе перспективных площадей // Тр. Учреждения Рос. академии наук Ин-та геологии руд, месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН. Новая серия. — 2010. — Вып. 4: Современные проблемы рудной геологии, петрологии, минералогии и геохимии. — С. 59—84. — ISBN 978-5-88918-019-7.
7. Константинов Р. М. Математические методы количественного прогноза рудоносности. — М.: Недра, 1979. — 127 с.
8. Бортников Н. С., Лобанов К. В., Волков А. В. и др. Месторождения стратегических металлов Арктической зоны // Геология руд, месторождений. — 2015. — Т. 57, № 6. — С. 479—500. — DOI: 10.7868/S0016777015060027.
9. Волков А. В., Сидоров А. А., Галямов А. Л., Чижова И. А. Вопросы глобальной металлогенической зональности Тихоокеанского рудного пояса: выводы для прогнозно-металлогенических исследований на Востоке России // Отечеств. геология. — 2018. — № 4. — С. 18—25. — DOI: 10.24411/0869-7175-2018-10002.
10. Проект «Электронная Земля». — URL: http://earth.jssc.ru/metal/do_search.php?&lang=ru.
11. Кузнецов В. М., Нищанский Г. М., Палымская З. А. Признаки проявления и формы выражения тектоно-магматической активизации на примере Хурчан-Оротуканской зоны // Колыма. — 1993. — № 7. — С. 7—12.
12. Davis J. C. Statistics and Data Analysis in Geology. — 3d ed. — [S. l.]: Wiley, 2002. — 656 p. — ISBN 978-0471172758.
13. Волков А. В., Савва Н. Е., Колова Е. Е. и др. Au-Ag-эпитермальное месторождение Двойное (Чукотка) // Геология руд, месторождений. — 2018. — Т. 60, № 6. — С. 590—609. — DOI: 10.1134/S0016777018060060.

Информация об авторах

Чижова Ирина Александровна, доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН (119017, Россия, Москва, Старомонетный пер., д. 35), e-mail: tchijova@igem.ru.

Лобанов Константин Валентинович, доктор геолого-минералогических наук, член-корреспондент РАН, главный научный сотрудник, Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН (119017, Россия, Москва, Старомонетный пер., д. 35), e-mail: lobanov@igem.ru.

Волков Александр Владимирович, доктор геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией, Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН (119017, Россия, Москва, Старомонетный пер., д. 35), e-mail: tma2105@mail.ru.

Библиографическое описание данной статьи

Чижова И. А., Лобанов К. В., Волков А. В. Логико-информационные модели для прогноза и оценки новых месторождений золота в Арктической зоне России // Арктика: экология и экономика. — 2019. — № 4 (36). — С. 107—117. — DOI: 10.25283/2223-4594-2019-4-107-117.

LOGICAL AND INFORMATION MODELS FOR THE FORECAST AND RAPID ASSESSMENT OF NEW GOLD DEPOSITS IN THE ARCTIC ZONE OF RUSSIA

Chizhova I. A., Lobanov K. V., Volkov A. V.

Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry, RAS (Moscow, Russian Federation)

The article was received on March 01, 2019

Abstract

Logical and information models were developed based on a wide range of elements and a representative database (DB) for 95 gold deposits and gold occurrences in the North-East of Russia. As a result of the calculation, the elemental logical and information models for each ore-informational type were obtained: Au-Ag-epithermal; Au-quartz; Au-sulfide; Cu-Mo-Au porphyry; pyrite-polymetallic, enriched with Au and Ag. The rules were developed that made it possible to reliably identify the samples (43 errors out of 289 samples, recognition quality = 0.85). It is shown that developed models can be used to forecast and evaluate new gold deposits in the Arctic zone of Russia.

Keywords: the Arctic zone, gold, deposits, logical and information model, ore formation type, microelements, forecast.

The work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (Grant No. 18-05-70001) "Study of the geological and geodynamic settings for the formation of large deposits of strategic metals in the Arctic zone of Russia: conclusions for forecasting and prospecting of new deposits".

References

1. Volkov A. V., Galyamov A. L., Lobanov K. V. Mineral'noe bogatstvo Tsirkumarkticheskogo poyasa. [The mineral wealth of the Circum-Arctic belt]. *Arktika: ekonomika i ekologiya*, 2019, vol. 33, no. 1 (33), pp. 106—117. DOI:10.25283/2223-4594-2019-1-106-117. (In Russian).
2. Volkov A. V., Sidorov A. A., Savva N. E., Kolova E. E., Chizhova I. A., Murashov K. Yu. The Geochemistry of Volcanogenic Mineralization in the Northwestern Segment of the Pacific Ore Belt: Northeast Russia // *J. of Volcanology and Seismology*, 2017, vol. 11, no. 6, pp. 389—406. DOI: 10.1134/S0742046317060070.
3. Tou J., Gonzalez R. Pattern recognition Principles. Addison-Wesley Publ. Company. [S. l.], 1974, 377 p. ISBN 9780201075861.
4. Waterman D. A guide to expert systems. Addison-Wesley Publ. Company. [S. l.], 1986, 419 p.
5. Chizhova I., Volkov A. Hybrid expert system for prediction and prospecting of gold ore deposits in the Arctic zone. 17th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2017, www.sgem.org, SGEM2017 Conference Proceedings, June 29 — July 05, 2017, Albena, Bulgaria. Vol. 17: Informatics, Geoinformatics and Remote Sensing, iss. 21, p. 351—358. ISBN 978-619-7408-01-0; ISSN 1314-2704. DOI: 10.5593/sgem2017/21/S07.045.
6. Chizhova I. A. Logiko-informatsionnoe modelirovanie pri prognozno-metallogenicheskom analize perspektivnykh ploshchadei. [Logic-information modeling for prospecting metallogenic analysis of promising areas]. Research papers published by the RAS Institute for Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy, and Geochemistry: new series. Iss. 4: Current problems of ore geology, petrology, mineralogy and geochemistry]. *Tr. Uchrezhdeniya Ros. akademii nauk In-ta geologii rud mestorozhdenii, petrografii, mineralogii i geokhimii* RAN. Novaya seriya, 2010, iss. 4: Sovremennyye problemy rudnoi geologii, petrologii, mineralogii i geokhimii, pp. 59—84. ISBN 978-5-88918-019-7. (In Russian).
7. Konstantinov R. M. Matematicheskie metody kolichestvennogo prognoza rudonosnosti. [Mathematical methods for quantitative ore-bearing prediction]. Moscow, Nedra, 1979, 127 p. (In Russian).
8. Bortnikov N. S., Lobanov K. V., Volkov A. V. et al. Strategic Metal Deposits of the Arctic Zone. *Geology of Ore Deposits*, 2015, vol. 57, no. 6, pp. 433—453. DOI: 10.1134/S1075701515060021.
9. Volkov A. V., Sidorov A. A., Galyamov A. L., Chizhova I. A. Voprosy global'noi metallogenicheskoi zonal'nosti Tikhookeanskogo rudnogo poyasa: vyvody dlya prognozno-metallogenicheskikh issledovaniy na Vostoke Rossii. [Issues of the global metallogenic zoning of the Pacific ore belt: conclusions for metal metallogenic research in Eastern Russia]. *Otechestv. geologiya*, 2018, no. 4, pp. 18—25. DOI: 10.24411/0869-7175-2018-10002. (In Russian).
10. Proekt "Elektronnaya Zemlya". [Digital Earth RAS project]. Available at: http://earth.jssc.ru/metal/do_search.php?&lang=ru. (In Russian).
11. Kuznetsov V. M., Nishchanskii G. M., Palym'skaya Z. A. Priznaki proyavleniya i formy vyrazheniya tektono-magmaticheskoi aktivizatsii na primere Khurchan-Orotukanskoi zony. [Signs of manifestation and forms of expression of tectono-magmatic activation on the example of the Khurchan-Orotukansky zone]. *Kolyma*, 1993, no. 7, pp. 7—12. (In Russian).
12. Davis J. C. Statistics and Data Analysis in Geology. 3d ed. [S. l.], Wiley, 2002. 656 p. ISBN 978-0471172758.
13. Volkov A. V., Savva N. E., Kolova E. E., Prokof'ev V. Yu., Murashov K. Yu. Dvoynoe Au-Ag Epithermal Deposit, Chukchi Peninsula, Russia. *Geology of Ore Deposits*, 2018, vol. 60, no. 6, pp. 527—545. DOI: 10.1134/S1075701518060053.

Information about the authors

Chizhova Irina Aleksandrovna, Doctor of Geology and Mineralogy, Leading Researcher, Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences (35, Staromonetny Lane, Moscow, Russia, 119017), e-mail: tchijova@igem.ru.

Lobanov Konstantin Valentinovich, Doctor of Geology and Mineralogy, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Chief Researcher, Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences (35, Staromonetny Lane, Moscow, Russia, 119017), e-mail: lobanov@igem.ru.

Volkov Alexander Vladimirovich, Doctor of Geology and Mineralogy, Head of Laboratory, Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences (35, Staromonetny Lane, Moscow, Russia, 119017), e-mail: tma2105@mail.ru.

Bibliographic description

Chizhova I. A., Lobanov K. V., Volkov A. V. Logical and information models for forecast and rapid assessment of new gold deposits in the Arctic zone of Russia. *Arctic: Ecology and Economy*, 2019, no. 4 (36), pp. 107—117. DOI: 10.25283/2223-4594-2019-4-107-117. (In Russian).