

Экспресс-оценка месторождений золота Арктической зоны России по геохимическим данным с использованием логико-информационных моделей

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

Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Москва, tchijova@igem.ru

Аннотация. Предложена процедура экспресс-оценки месторождений золота по геохимическим данным с использованием логико-информационных моделей, построенных для пяти рудноформационных типов месторождений золота Северо-Востока России: Au-Ag-эпитермального; Au-кварцевого, Au-сульфидного (вкрапленных руд); Cu-Mo-Au-порфирирового; колчеданно-полиметаллического, обогащенного Au и Ag. Алгоритм допускает корректное применение при идентификации рудноформационного типа новых рудопроявлений золота в Арктической зоне России с высокой степенью надежности (85 %).

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

Rapid assessment of gold deposits in the Arctic zone of Russia according to geochemical data using logical information models

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

Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy, and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences, Moscow, tchijova@igem.ru

Abstract. The procedure has been proposed for the rapid assessment of gold deposits using geochemical data and logical information models, designed for five ore formation types of gold deposits in the North-East of Russia: Au-Ag-epithermal; Au-quartz; Au-sulfide (disseminated ores); Cu-Mo-Au porphyry; pyrite-polymetallic enriched with Au and Ag. The algorithm may be correctly used for identifying the ore formation type of new gold occurrences in the Arctic zone of Russia with a high degree of reliability (85 %).

Key words: the Arctic zone, gold, deposits, logical-information model, database, ore-formation type, trace elements, forecast, rapid assessment.

Введение

Задачи определения рудноформационного типа оруденения и его масштабности являются первоочередными при выборе перспективных площадей для постановки геологоразведочных работ (ГРП). От правильного их решения зависит выбор направления и эффективной методики дальнейшего проведения ГРП, что способствует минимизации сроков их проведения, а также сокращению финансовых затрат. Результаты ГРП носят вероятностный характер. По данным М.З. Зиннатулина по твердым полезным ископаемым из 100 прогнозируемых участков, выявленных в ходе проведения ГРП, только на одном выявляется месторождение (Зиннатулин, 2003). Применение процедур экспресс-оценки месторождений будет способствовать более быстрой разбраковке выделенных участков. Следовательно, они будут весьма востребованы для расширения минерально-сырьевой базы золота России, особенно ее северо-восточных арктических регионов.

Методика исследований

В рудообразующих системах, распространенных на Северо-Востоке России, присутствуют различные рудноформационные типы месторождений золота, характеризующиеся отличающимися друг от друга специфическими наборами микроэлементов (Волков и др., 2017).

Математическое моделирование на базе машинного обучения позволяет автоматизировать процесс их поиска. В качестве способа выделения системы информативных признаков с указанием их разделяющих весов и диапазонов изменения значений (интервалов-индикаторов), типич-

ных для месторождений золота конкретного рудноформационного типа, был использован логико-информационный анализ (Чижова, 2010).

В его основе лежат принцип общности свойств, принцип перечисления объектов и метод вариационных рядов, использование которого в рудной геологии было предложено Р.М.Константиновым (Константинов, 1979). Логико-информационное моделирование по современной классификации можно отнести к методам машинного обучения, поскольку модели и решающие правила получаются на основе компьютерного анализа выборки из базы данных эталонных месторождений. В нашем случае для описания золоторудных объектов использовались геохимические характеристики 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 (Chizhova et al., 2018; Бортников и др., 2015). Результаты анализов (ААС, ICP-MS и РФА) выполнены в аналитической лаборатории ИГЕМ РАН.

Для проведения экспертизы объекта оценки (перспективной площади) с целью определения его рудноформационного типа месторождений и оценки масштаба предлагается следующая последовательность операций (рис. 1).

Процедура математической обработки данных по эталонным и контрольным месторождениям описана в (Чижова, 2010) и основана на выделении 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; с последующей оценкой степени их информативности для определения различий между группа-

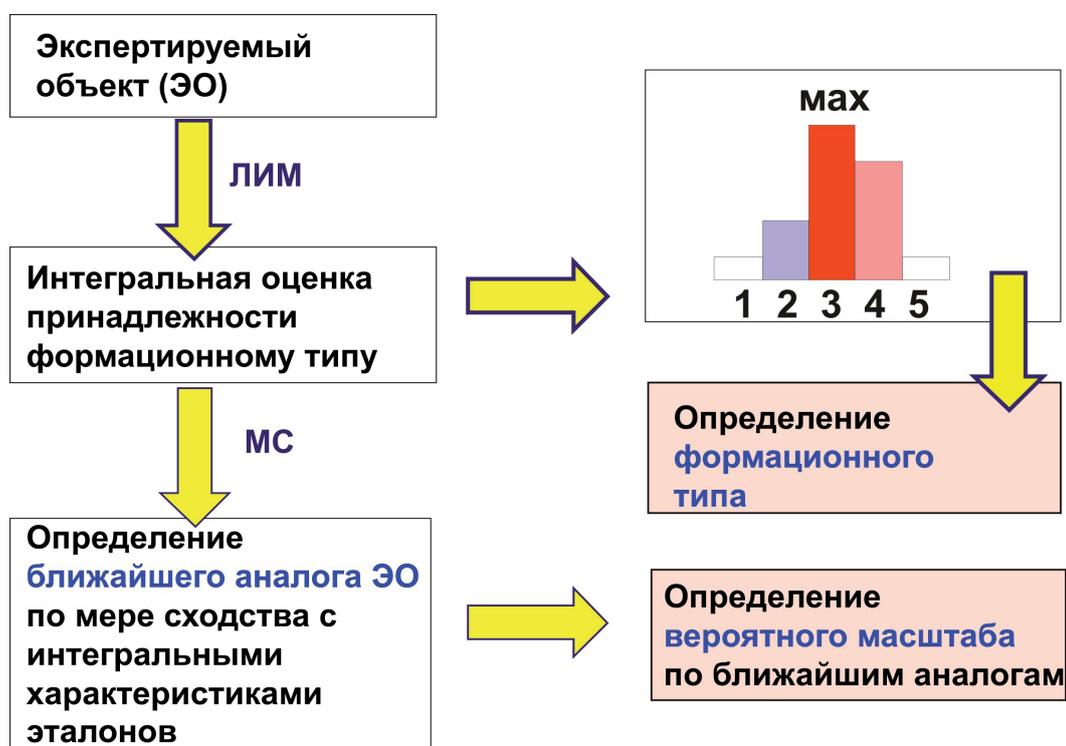


Рис. 1. Последовательность операций для экспертизы объекта оценки. ЛИМ – логико-информационное моделирование; МС – расчет мер сходства.

Fig. 1. The sequence of operations for the examination of the object of assessment LIM – logical information modeling; MS – calculation of similarity measures.

ми. Алгоритмы расчета функций информативности признаков, разделяющих весов информативных признаков, функций принадлежности объекта (пробы) группе описаны в работе (Чиждова, 2010).

Метод позволяет классифицировать каждую пробу и определить ее вероятную принадлежность к той или иной группе, выделенной по рудноформационному типу. В результате проведенной логико-информационной обработки каждый образец базы данных был идентифицирован с оценкой принадлежности к изученным типам. Специфичность каждой группы в целом описана согласно выделенным интервалам-индикаторам признаков (элементов). На основании полученных оценок (функций принадлежности объекта (пробы) группе) принимается решение о принадлежности изучаемых объектов конкретной группе: объект относится к той группе, для которой значение функции принадлежности принимает максимальное значение (рис. 1).

Математическая обработка данных позволила нам построить логико-информационные модели на 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 рудноформационных типов).

На основе вычисления меры сходства Говера (Davis, 2002), характеризующей степень похожести проб по значениям функций принадлежности изученным рудноформационным типам, выбирались ближайшие объекты-аналоги для объекта оценки. Масштабность объекта определялась по методу аналогии по ближайшим аналогам (рис. 1) (Чиждова и др., 2019₁).

Результаты анализа

Сравнительный анализ золоторудных месторождений по геохимическим данным проводился для следующих рудноформационных типов, распространенных на Северо-востоке России (Волков и др., 2018): 1. Au-Ag-эпитермального; 2. Au-кварцевого; 3. Au-сульфидного (вкрапленных руд); 4. Cu-Mo-Au-порфирирового; 5. колчеданно-полиметаллического, обогащенного Au и Ag.

Элементные логико-информационные модели для каждой рудной формации были представлены как наборы из 52 признаков-элементов с информационными весами в интервале [0, 1] и диапазонами изменения их значений (интервалами-индикаторами) (Chizhova et al., 2018; Чиждова и др., 2019₃). Для каждого элемента выделены специфичные диапазоны изменения его значений по выборкам изучаемых рудных формаций. Наиболее значимые элементы для выявления различий между рудноформационными типами (по величине разделяющих весов) перечислены далее для каждой из 5 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. Данные результаты получены при анализе эталонной выборки, содержащей в таблице обучения, соответственно, для каждого типа по 146, 89, 30, 19, 5 объектов. Полученные решающие правила позволили надежно идентифицировать пробы (43 ошибки из 289 проб эталонных месторождений, качество распознавания 85 %).

Экспресс-оценка новых проявлений золота

Логико-информационные модели (далее модели) использовались для экспресс-оценки новых проявлений золота перспективных площадей Арктической зоны, находящихся в сходных геологических условиях. Для определения рудноформационного типа нового рудопроявления по штучным пробам¹, рассчитывалось значение функции принадлежности проб к анализируемым группам эталонов как суммарный вес индикаторных данных проб последовательно для каждой модели (суммируются разделяющие веса тех элементов, для которых значение в пробе попадает в интервал-индикатор соответствующего рудноформационного типа). Оцениваемый новый объект относится к тому рудноформационному типу, для которого суммарный вес индикаторных данных примет максимальное значение среди всех вычисленных суммарных весов по каждому рудноформационному типу.

В качестве исходных данных по новым экспертируемым объектам использовались геохими-

¹ Штучное 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.

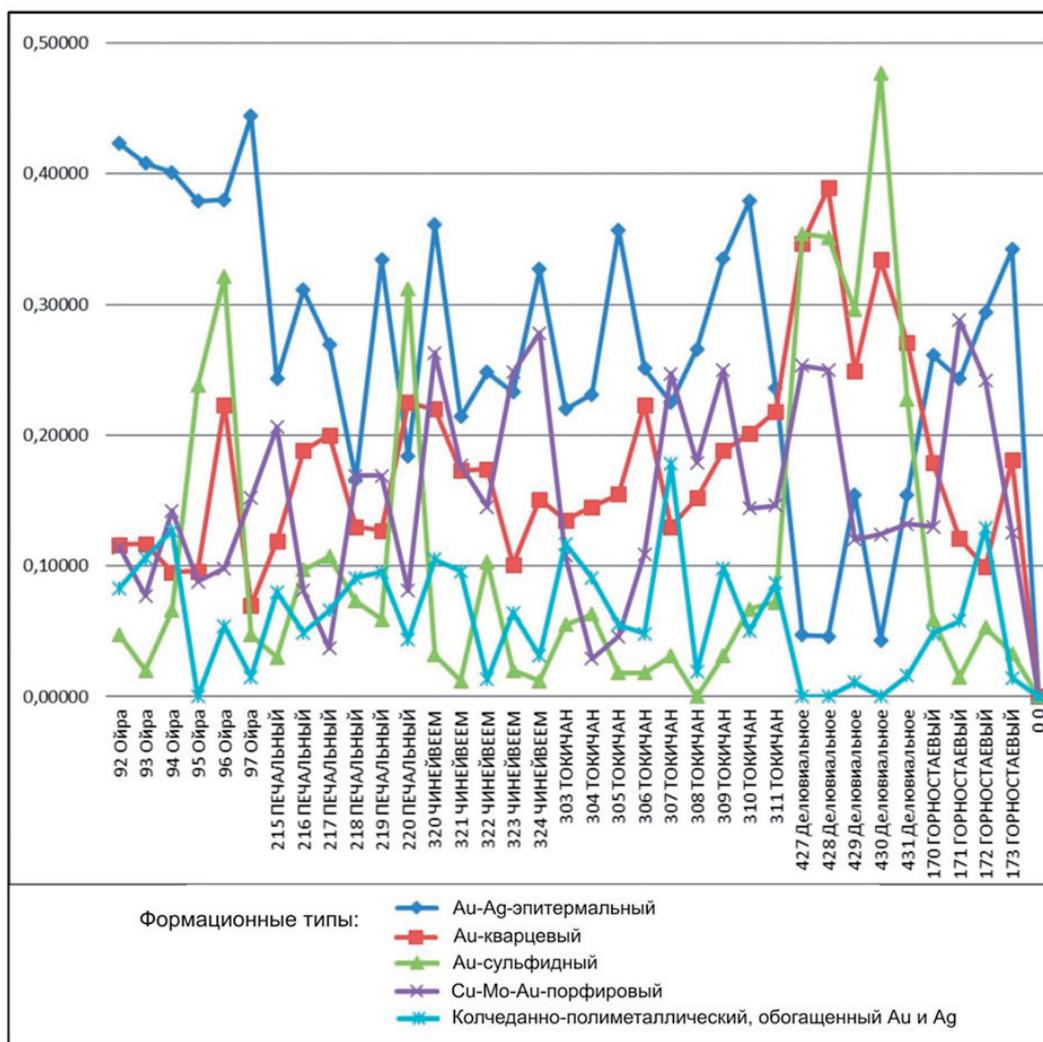


Рис. 2. Результат автоматизированной типизации новых проявлений золота.

Fig. 2. Result of automated typification for new gold ore occurrences.

ческие данные по золоторудным объектам: Ойра (6 проб), Печальный (6 проб), Чинейвеем (5 проб), Токичан (9 проб), Делювиальное (5 проб), Горностаевый (4 пробы). На рисунке 2 представлены результаты компьютерной экспресс-оценки перечисленных выше рудопоявлений с использованием разработанного в ИГЕМ РАН Excel-модулем, куда пользователю предоставляется возможность ввести свои данные по экспертируемому объекту и получить оценку в графической и табличной форме (Чижова и др., 2019).

На графике (рис. 2), соответственно, отображены все вычисленные значения функции принадлежности проб новых проявлений золота для каждого типа. Над всеми линиями доминирует линия, соответствующая типу Au-Ag-эпитермальный, для всех экспертируемых объектов, кроме Делювиального, что соответствует оценке экспертов-геологов.

Ближайшие аналоги среди эталонов по коэффициенту сходства² (> 0.940) – также месторождения первого рудноформационного типа: Ойра (Кубака (0.956*), Аметистовое (0.954)), Печальный (Магнитный (0.966), Ольча (0.965)), Чинейвеем (Эргувеем (0.968), Теплое (0.945)), Токичан (Биркачан (0.960), Пепенвеем (0.950), Южное Бургали (0.950)), Горностаевый (Джультта (0.971), Биркачан (0.956)).

² В работе использовалась мера сходства Говера (Davis, 2002), характеризующая степень похожести проб по значениям функций принадлежности изученным рудноформационным типам.

Для объекта Делювиальное (Дражное (0.965), Хугланнах (0.922)) ближайшие аналоги второго рудноформационного типа (Au-кварцевого типа). На рисунке 2 пробы проявления Делювиальное характеризуются высокими весами двух рудноформационных типов: второго (Au-кварцевого) и третьего (Au-сульфидного), что позволяет рассматривать его как полиформационное и по-новому оценить его масштаб как, возможно, крупного объекта.

Для объекта Токичан, кроме первого (Au-Ag-эпитермального), отмечены также высокие веса для второго рудноформационного типа (Au-кварцевого) (см. рис. 2), что подтверждает оценку экспертов-геологов.

Масштабы эталонных месторождений – ближайших аналогов для объектов оценки в основном не противоречат прогнозной оценке новых объектов: крупные – Ойра; средние – Токичан, Делювиальное, Горностаевый; мелкие – Печальный, Чинейвеем. Исключение составляет месторождение Ойра, которое по предварительным оценкам было отнесено ранее в базе данных к мелким объектам. Результаты компьютерного моделирования, позволяют рекомендовать продолжить изучение месторождение Ойра.

Заключение

Предложенная процедура экспресс-оценки золоторудных месторождений, включающая в себя использование логико-информационных моделей, разработанных на основе анализа репрезентативной базы аналитических данных по эталонным месторождениям золота Северо-Востока России, и метод выбора ближайшего аналога, может быть использована в сходных геологических условиях при изучении и оценке новых золоторудных объектов, в том числе и в арктической зоне России.

Модели рассчитаны по геохимическим данным для пяти рудноформационных типов месторождений золота: Au-Ag-эпитермального; Au-кварцевого; Au-сульфидного (вкрапленных руд); Cu-Mo-Au-порфирирового; колчеданно-полиметаллического, обогащенного Au и Ag. Полученные решающие правила позволили надежно идентифицировать рудноформационный тип месторождений золота (качество распознавания 85 %).

Разработан расчетный Excel-модуль для автоматизированной типизации новых золоторудных объектов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 18-05-70001).

Литература

1. Бортников Н.С., Лобанов К.В., Волков А.В. и др. Месторождения стратегических металлов Арктической зоны. Геология рудных месторождений, 2015. Т. 57. № 6. С. 479–500. DOI: 10.7868/S0016777015060027.
2. Волков А.В., Сидоров А.А., Савва Н.Е., Колова Е.Е., Чижова И.А., Мурашов К.Ю. Геохимические особенности вулканогенного рудообразования в северо-западном сегменте Тихоокеанского рудного пояса // Вулканология и сейсмология. 2017. № 6. С. 3–20.
3. 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 // Отечественная геология. 2018. № 4. С. 18–25. DOI: 10.24411/0869-7175-2018-10002.
4. Зиннатулин М.З. О геологической и экономической эффективности геологоразведочных работ // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. 2003. № 1-2. С. 8–13.
5. Константинов Р.М. Математические методы количественного прогноза рудоносности. М. Изд-во: Недра. 1979. 127 с.
6. Чижова И.А. Логико-информационное моделирование при прогнозно-металлогеническом анализе перспективных площадей // Труды ИГЕМ РАН: новая серия. Вып. 4: Современные проблемы рудной геологии, петрологии, минералогии и геохимии М. Изд-во: ИГЕМ РАН. 2010. С. 59–84. ISBN 978-5-88918-019-7.
7. Чижова И.А., Волков А.В., Лобанов К.В. Методика компьютерной экспресс-оценки и выбора перспективных золоторудных объектов для постановки поисковых работ // Научно-методические основы прогноза, поисков, оценки месторождений алмазов, благородных и цветных металлов. Сборник тезисов докладов IX Международной научно-практической конференции. (17–19 апреля 2019 г., Москва, ФГБУ «ЦНИГРИ»). М. Изд-во: ЦНИГРИ. 2019. С. 154–155.
8. Чижова И.А., Волков А.В., Шелястина Е.В. Автоматизированная типизация золоторудных месторождений на основе логико-информационного анализа // Двадцатая международная конференция «Физико-

-
- химические и петрофизические исследования в науках о Земле». Москва, 23-35, Борок, 27 сентября 2019 г. Материалы конференции. М. Изд-во: ИГЕМ РАН, 2019₂. С. 347–351. ISBN 978-5-88918-056-2.
9. 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. 2019₃, № 4 (36). С. 107–117. DOI: 10.25283/2223-4594-2019-4-107-117.
 10. Chizhova I., Lobanov K., Volkov A. Logical-Information Models of Formation Types of Gold Deposits in the North-east of Russia // 18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2018, www.sgem.org, SGEM2018 Conference Proceedings, 2 July -8 July, 2018, Albena, Bulgaria. V. 18. Science and Technologies in Geology, Exploration and Mining. Issue 1.1. P. 213–220. ISBN 978-619-7408-35-5 / ISSN 1314-2704. DOI: 10.5593/sgem2018/1.1/S01.028.
 11. Davis J.C. Statistics and Data Analysis in Geology. 3d ed. [S. l.]: Wiley. 2002. 656 p. ISBN 978-0471172758.