

Использование геофизических методов для разделения типов вторичных изменений пород при поисках эпитермального золота

Е.Ю.Ермолин* (ООО «ДЖИ М Сервис»), В.Н. Мельников (ООО «ДЖИ М Сервис»)



Рисунок 1. Положение участка работ на тектонической схеме

Введение

В пределах киммерид Охотско-Чукотского вулканического пояса (Дальний Восток России) сосредоточен ряд средних и крупных золото-серебряных эпитермальных месторождений (Рисунок 1). Существует принципиально два разных типа эпитермальных месторождений: LS (с пониженной сульфидизацией) и HS (с повышенной сульфидизацией). В данной работе речь пойдет о LS-эпитермальных месторождениях с преобладанием кварцево-жильного оруденения. Именно в этих жилах сосредоточены руды, наиболее богатые золотом (Hedenquist et al., 2000).

Принятая авторами схематическая геолого-генетическая модель LS-эпитермального золотосеребряного месторождения изображена на рисунке 2. Для формирования месторождения необходимо:

- источник растворов в виде магматического тела кислосреднего состава;
- наличие глубинного канала миграции флюидов (зона глубинного разлома);
- на определённом расстоянии от источника необходимо наличие блока крепких пород, чтобы рудоносный флюид кристаллизовался в узкой зоне, а не рассеялся в пористой среде;
- эпитермальные жилы сопровождаются зонами изменений различного типа.



Рисунок 2. Схематическая геолого-генетическая модель эпитермального месторождения. (Hedenquist et al. 2000, модифицированная Ermolin et al. 2018)

Отдельные LS-эпитермальные жилы мощностью в несколько метров могут простираться на расстояния до 1-5 км и содержать до нескольких сотен тонн золота. Обработка таких объектов экономически оправдана, даже если они перекрыты более чем 300-метровой толщиной вулканических пород. Поиск перекрытых жил является сложной геологоразведочной задачей и без привлечения геофизических методов решить эту задачу непросто. Геофизические методы давно применяются при поисках золота. Обзор некоторых успешных геофизических работ сделан в исследованиях Terry Hoshke (Hoshke 2008), существуют и другие примеры.

Пример успешного применения технологии аудиоманнителлурического зондирования (АМТ) (Berdichevskiy and Dmitriev 2009) на Чукотке был представлен автором в работах (Ermolin et al. 2016 and Ermolin et al. 2018). На рисунке 3а показано положение жильных тел до и после проведения работ. Месторождение расположено в зоне высокого сопротивления. Именно по положению зоны высокого сопротивления удалось проследить часть жильной зоны, опущенной на севере и сдвинутой на восток. В последующие годы на этом объекте были выполнены наземная магнитная и гравиметрическая съёмка. В результате анализа данных составлена физико-геологическая модель этого месторождения (вдоль профиля 2). Модель представлена на рисунке 3б. В работе (Ermolin et al. 2018) описаны геофизические особенности месторождения. Этими особенностями являются: зоны повышенного удельного электрического сопротивления и пониженной магнитной восприимчивости, а так же близость к контакту блоков, обладающих различным удельным электрическим сопротивлением и плотностью (близость к разлому). Все эти геофизические особенности месторождения в настоящий момент используются на соседних площадях для поиска золотоносных жил. Как правило, в 80% случаях по геофизическим данным удаётся найти новые жилы, но не всегда новые жилы являются промышленными. Для увеличения шансов найти новое месторождение автор поставил перед собой задачу определить дополнительные поисковые критерии. Для достижения этой цели был использован метод вызванной поляризации (ВП) в многочастотном варианте. Работы выполнены на описанном выше объекте вдоль профиля 2 (Рис.3а). Результаты геофизики сравнивались с данными буровых скважин: а) геологическим разрезом; б) разрезом распределения типов изменений вокруг месторождения. Известно, что данное месторождение имеет определённую зональность типов изменений. Важной задачей геофизики является разделение типов изменений, для поиска новых месторождений.

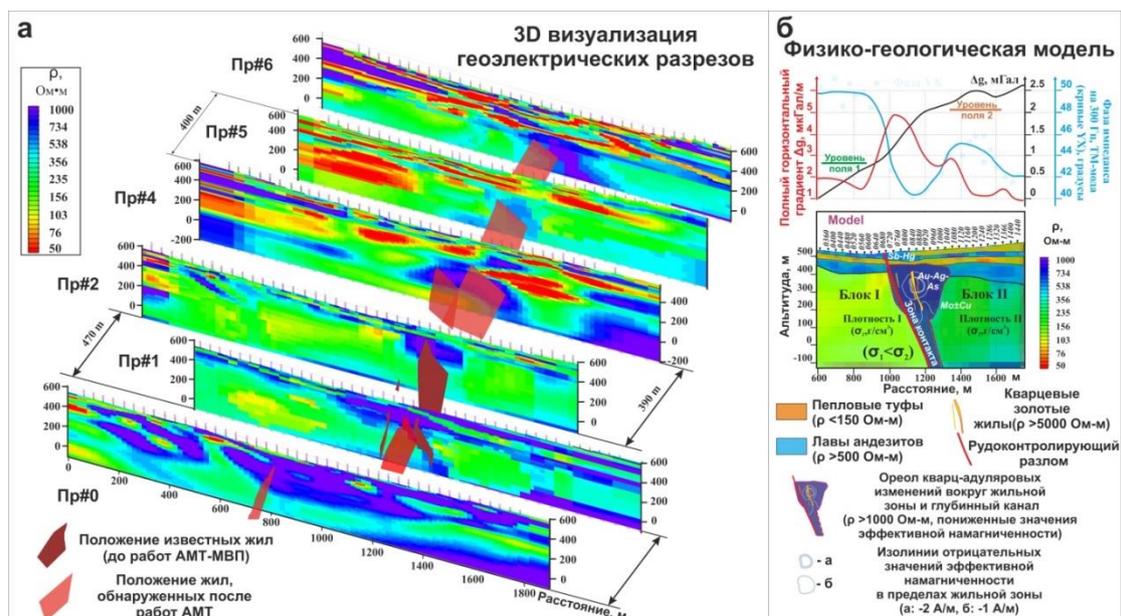


Рисунок 3. а – 3Д визуализация геоэлектрических разрезов (2Д инверсия по данным АМТ-МВП). б – физико-геологическая модель LS-эпитермального месторождения по геофизическим данным.

Методика

Работы выполнялись по методике вертикального электрического зондирования (ВЭЗ). Использовалась симметричная четырёхэлектродная установка Шлюмберже. Разносы питающих диполей изменялись до 1680 метров ($AB/2$ – 840 метров) с арифметическим шагом, кратным 40 метрам. Шаг вдоль профиля составил 40 метров. Измерения выполнялись в частотной области. Использовались 6 частот: 4.88, 2.44, 1.22, 0.61, 0.31, 0.16 Гц. Сила тока в зависимости от сопротивления заземления составляла от 0.2 до 1.6 ампер. В качестве источника тока использовался генератор ВП-1000, в качестве регистратора использовался ИМВП-8. Кажущаяся поляризуемость рассчитывалась, как сдвиг фазы между 1-й и 3-й гармоникой, умноженный на -2.5. Результаты показаны в процентах.

Для анализа данных ВП использовались зависимости кажущейся поляризуемости от частоты и величины разноса для каждого пикета ВЭЗ. Эти зависимости наглядно показаны на рисунке 4. Эти зависимости можно называть частотными характеристиками ВП. По горизонтальной оси отложены частоты, на которых производились измерения. На вертикальной оси обозначена величина разноса (длина генераторного диполя $AB/2$). Цветовой шкалой обозначена амплитуда кажущейся поляризуемости в %. Интерпретация данных ВП выполнена с использованием алгоритма 2Д инверсии, реализованного в программе ZondRes2D. Результат двумерной инверсии показан в виде разреза поляризуемости.

В распоряжении автора были данные буровых скважин (литология и информация об типах изменениях керна). На основании этих данных были построены схематический геологический разрез (Рис.5а) и схематический разрез распределения различных типов изменений пород (Рис.5г).

Анализ данных

Следует отметить, что в зависимости от частоты кажущееся электрическое сопротивление практически не менялось. При этом результаты ВП на различных частотах сильно изменялись.

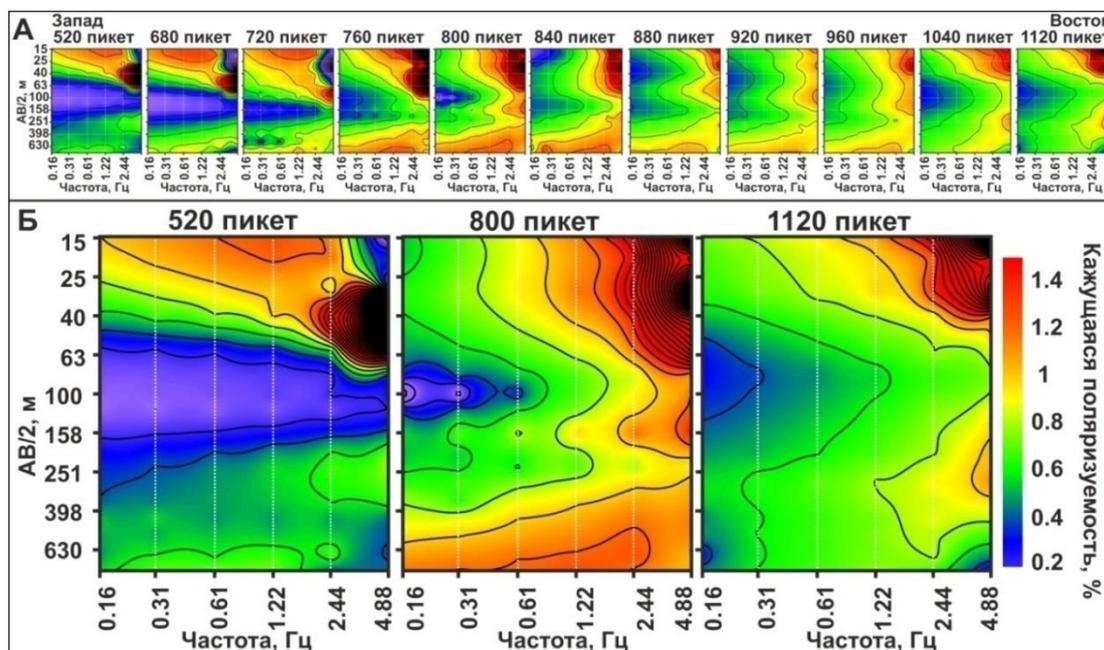
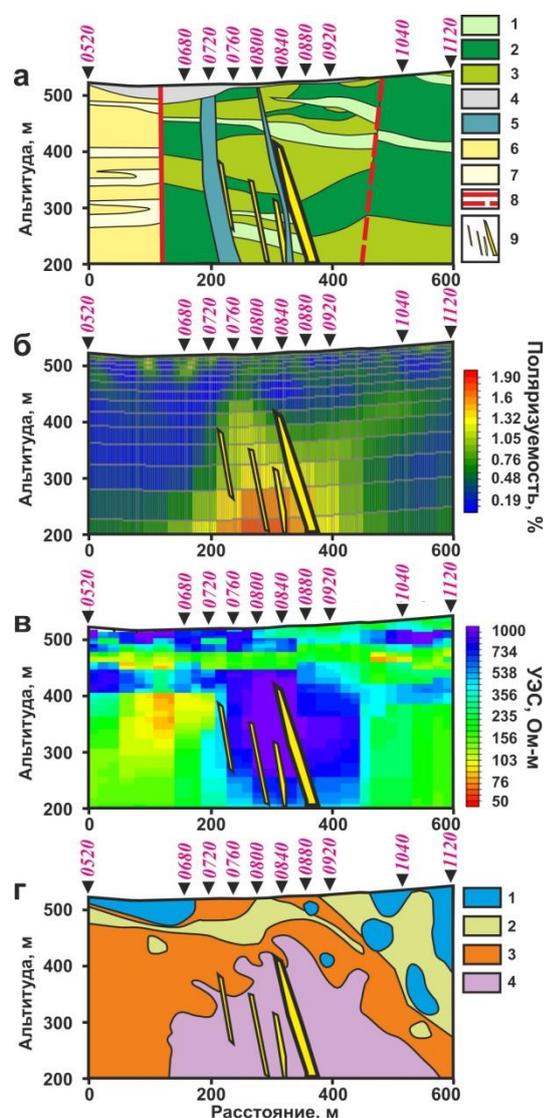


Рисунок 4. А - Зависимость кажущейся поляризуемости от частоты для каждого пикета ВЭЗ. Б - Зависимость кажущееся поляризуемости от частоты для пикетов ВЭЗ 520, 800, 1120

На частотных характеристиках ВП (Рис. 4) видно, что на малых разностях ($AB/2 < 240$ метров) наблюдаются аномалии на частоте 1,22 Гц и 4,88 Гц. С запада на восток разнос, на котором проявляется максимум этих аномалий, увеличивается. Эта закономерность хорошо согласуется с увеличением глубины кровли пепловых туфов (рисунок 5а). Пачки пепловых туфов в исследуемом районе могут содержать включения пирита и халькопирита, что может объяснять природу аномалий ВП. Альтернативное объяснение природы аномалий на высоких частотах это эффект от многолетнемерзлых пород (эффект Максвелла-Вагнера) (Kozhevnikov, 2012).

На больших разностях генераторного диполя ($AB/2 > 240$ метров), на пикетах 760-880 на частотах 0,31-2,44 Гц наблюдаются наибольшие значения кажущейся поляризуемости (1,1-1,3%). Под этими пикетами на глубине 120 метров расположено месторождение. Золотоносные кварцевые жилы этого месторождения имеют мощность до 3 метров и вертикальное падение. Размер промышленной части жильных тел доходит по глубине до 600 метров.

Исходя из анализа частотных характеристик ВП можно сделать вывод, что аномалии на частоте ниже 1,22 Гц относятся к отклику от месторождения, а аномалии на частоте выше 1,22 Гц относятся к объектам, расположенным в перекрывающих породах. Для получения разреза поляризуемости отражающего положение месторождения целесообразно использовать данные кажущейся поляризуемости, измеренной на частоте ниже 1,22 Гц.



Результаты

Рисунок 5. а – схематический геологический разрез (1-пепловые туфы, 2- андезит-базальтовые лавы, 3- Неразделенные лавы и туфы, 4-четвертичные отложения, 5-Дайки андезит-дацитовых порфиритов, 6-фельзиты, 7-Вулканокластические породы, 8-разломы, 9-кварцевые, золотоносные жилы) б – разрез поляризуемости, в – геоэлектрический разрез по данным АМТ, г – типы изменений (1-сметиты, 2-каолиниты, 3-иллиты, 4- иллит-хлориты).

На рисунке 5б показаны результаты решения обратной 2Д задачи для частоты 0,31 Гц. На разрезе наблюдается аномалия повышенной поляризуемости с амплитудой до 1,8 % (на высоте от 400 до 200 метров). Эта аномалия совпадает с положением жильной зоны месторождения. Таким образом, аномалии поляризуемости, измеренные на частотах ниже 1,22 Гц, следует считать важным поисковым критерием в данном районе.

Исходя из рисунка 5г видно, что данное месторождение имеет ярко выраженную зональность вторичных изменений. Вдали от золотоносной жилы зоны изменений – смектиты. При приближении к месторождению появляются каолинитовые изменения. Ядро месторождения характеризуется иллит-хлоритовыми изменениями. Ядро окружено иллитовыми изменениями. Таким образом, определение положения и типов

вторичных изменений является важной задачей для геофизических методов.

Если сравнивать разрез вторичных изменений (Рис. 5г) с разрезом удельного электрического сопротивления по данным АМТ, то можно сделать несколько выводов:

1. Ядро месторождения (иллит-хлоритовые изменения) обладают высокими значениями сопротивления (более 2000 Ом-м).
2. Зоны иллитовых и каолинитовых изменений хорошо соотносятся с зонами пониженного сопротивления (50-300 Ом-м).
3. Высокими сопротивлениями обладают также зоны различных изменений расположенных за пределами месторождения.

Последний факт говорит о том, что нельзя однозначно картировать зоны иллит-хлоритовых изменений используя сопротивление. В этом случае наиболее выигрышным геофизическим поисковым критерием становятся аномалии поляризуемости на частоте 0.31 Гц. т.к. аномалия поляризуемости на рисунке 5б маркирует только положение ядра иллит-хлоритовых изменений месторождения.

На рисунке 3а видно, что месторождение характеризуется пониженными значениями магнитной восприимчивости. Следовательно, иллит-хлоритовые изменения характеризуются пониженными значениями магнитной восприимчивости.

Выводы

В условиях Охотско-Чукотского вулканического пояса наиболее важным геофизическим критерием при поисках золотоносных LS-эпитермальных кварцевых жил являются аномалии поляризуемости на частоте 0.31 Гц. Эти аномалии связаны с зонами иллит-хлоритовых изменений ядра месторождений. Иллит-хлоритовые изменения данного месторождения характеризуются повышенным сопротивлением (до 2000 Ом-м) и пониженной магнитной восприимчивостью. Зоны иллитовых и каолинитовых изменений, окружающие ядро характеризуются пониженным удельным электрическим сопротивлением (50-300 Ом-м).

References

- Berdichevsky, M.N. and Dmitriev, V.I. [2008] Models and methods of magnetotellurics. *Springer-Verlag*, Berlin, Heidelberg
- Ermolin, E., Savichev, A. and Ingerov, I. [2016] Additional exploration of gold deposit in Chukotka by AMT and MVP. *Proceedings of the Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems, SAGEEP* (Abstract)
- Ermolin, E., Ingerov, O. and Savichev, A. [2018] Integration of the AMT in Ls-epithermal Au-Ag Veins exploration in Chukotka region. *Engineering and Mining Geophysics 2018 - 14th Conference and Exhibition* (Abstract)
- Ermolin, E., Ingerov, O., Savichev A. and Smirnov, M. [2018] The physico-geological model of the epithermal Au-Ag deposit (Chukotka) on the basis of the integration AMT investigations. *24th EM Induction Workshop*, Helsingør, Denmark (Abstract).
- Hedenquist, J.W., Arribas, A.R, Gonzalez-Urien, E. [2000] Exploration for Epithermal Gold Deposits. *SEG Reviews*, V. 13: 245-277.
- Hoschke, T. [2008] Geophysical signatures of copper-gold porphyry and epithermal gold deposits. *Arizona Geological Society Digest* 22 (Abstract).
- Kozhevnikov, N.O. [2012] Fast-decaying inductive IP frozen ground. *Geology and geophysics*, 53,4, 527-540.