

Физико-геологическая модель эпитермального Au-Ag месторождения (Чукотка) на основе комплекса геофизических и геохимических исследований

Ермолин Евгений Юрьевич¹, Ингеров Олекс², Савичев Андрей Александрович^{1,3,4}

¹ “ДЖИ М Сервис” ООО, Санкт-Петербург, Россия

² “Phoenix-Geophysics ltd” Торонто, Онтарио, Канада

³ “НОРИЛЬСКГЕОЛОГИЯ” ООО; Санкт-Петербург, Россия

⁴ “Горный университет”, Санкт-Петербург, Россия

Введение

На Дальнем Востоке России сосредоточен ряд средних и крупных золото-серебряных эпитермальных месторождений. Как правило, наиболее богатые промышленные руды относятся к LS-типу, с преобладанием кварцево-жильного оруденения [Hedenquist et al., 2000]. Отдельные рудные жилы мощностью в несколько метров могут простираться на расстояния до 1 км и содержать до 10-15 тонн золота. Если такие жильные зоны являются сателлитами крупных тел уже разрабатываемых месторождений, то их отработка может быть экономически оправдана, даже в случае их перекрытия более чем 100-метровой толщей вулканических пород. Поиск подобных объектов (жила мощностью ~3 метра на глубине порядка 100 метров) является сложной геологоразведочной задачей, и, на первый взгляд, ни один отдельный геофизический метод не может справиться с ней.

В 2013 году перед авторами была поставлена задача выявить геофизическими методами северное продолжение известной жильной зоны на территории крупного рудного узла в пределах Охотского - Чукотского вулканического пояса (рис. 1а). Указанная малосульфидная эпитермальная кварцевая жила мощностью 3 метра имеет высокие (до 15-20 г/т) содержания золота. Жила локализована в поздне меловых лавах среднего состава (рис. 1б) и перекрыта 100-130 м толщей основных вулканитов со слоями пепловых туфов.

Для определения положения в плане и разрезе смещенной северной части жилы была применена технология 5-ти компонентных измерений естественного переменного электромагнитного поля Земли. Это позволило реализовать одновременно два самостоятельных метода: аудиоманнитотеллурическое зондирование (АМТ) [Berdichevsky and Dmitriev, 2008] и магнитовариационное профилирование (МВП) [Rokityansky, 1982]. Дополнительно выполнены работы методом вызванной поляризации и кажущегося сопротивления, которые не смогли обнаружить жильную зону, перекрытую слоями туфов-проводников. По результатам 2D инверсии данных АМТ-МВП были построены геоэлектрические разрезы и спрогнозировано северное положение жилы, которое подтвердилось бурением в 2014 году. Более подробно методика работ АМТ-МВП и анализ данных описаны в ранней публикации авторов [Ermolin et al., 2014].

Целью данной работы является демонстрация особенностей геофизических методов (АМТ-МВП, наземная гравитационная и магнитная съёмки), по которым можно определить положение перекрытой маломощной жильной зоны. Такие особенности авторы предлагают называть «геофизическими структурно-поисковыми критериями» эпитермального оруденения. В качестве основного результата исследований авторы позиционируют физико-геологическую модель эпитермальной золотоносной кварцевой жилы.

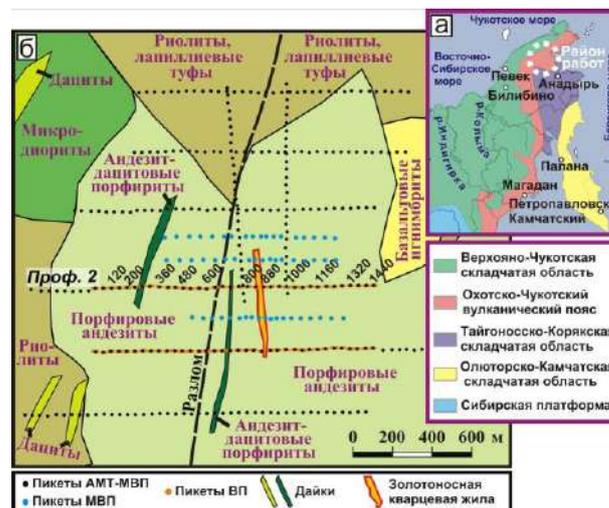


Рис. 1. а – положение района работ на фрагменте тектонической схемы России (по Цейслер В.М). б – схема геологического строения района с расположением пикетов АМТ, МВП и ВП.

Геологическая модель и предполагаемые физические свойства

В настоящий момент принятая нами обобщенная геологическая модель эпитермального LS-месторождения выглядит следующим образом:

- необходим источник растворов в виде магматического тела кислого-среднего состава (обычно расположен на периферии месторождения);
- должен присутствовать глубинный канал миграции флюидов (зона глубинного разлома);
- на определенном расстоянии от источника обязательно наличие блока крепких пород, чтобы рудоносный флюид кристаллизовался в узкой зоне, а не рассеялся в пористых породах;
- эпитермальные кварцевые жилы сопровождаются зоной гидротермально-метасоматических изменений (кварц-адуляровая минерализация и боковые зоны пропилитов).

Крупные зоны разломов обычно соответствуют контактам геологических блоков и могут ярко отражаться в гравитационном и магнитном аномальных полях. Зоны кварц-адуляровой минерализации обеднены магнетитом по отношению к вмещающей среде [Sillitoe, 2010]. Соответственно, зоны изменений характеризуются пониженными значениями магнитной восприимчивости. Весьма вероятно, что сама кварцевая жила и ореол кварц-адуляровых изменений вокруг неё, будут вместе характеризоваться аномальными повышенными значениями удельного электрического сопротивления. Таким образом, анализ данных АМТ-МВП, наземной магнитной и гравиметрической съемок позволит выделить особенности геофизических полей над известной жилой.

Анализ геофизических данных

Особенности геофизического отклика от жильной зоны, указанной на рисунке 1б, можно разделить на две группы: I. - проявление рудоконтролирующего разлома; II. - проявление жильных тел и зоны изменений вокруг них.

I. Проявление зоны рудоконтролирующего разлома.

Фаза магнитотеллурического импеданса является наиболее устойчивым параметром в методе АМТ. На рисунке 2а показана карта этого параметра на частоте 300 Гц. Градиентной зоной субмеридионального простирания изучаемая территория делится на две примерно равные части – восточную и западную. Указанная градиентная зона маркирует положение контакта двух крупных блоков и соответствует разлому. Данный разлом ярко проявляется на карте полного горизонтального градиента аномалии Буге (трансформация данных наземной гравиразведки) как контрастная положительная аномалия (Рис. 2г). В 350-400 м восточнее наблюдается ещё одна зона повышенного градиента аномалии Буге. Исходя из рисунка 2г, известные жилы локализованы в пределах зоны градиента шириной 350-450 метров. Общий азимут зоны повышенного градиента около 20 градусов. При этом отдельные локальные аномалии на рисунке 2г имеют азимут от -10 до 30 градусов.

II. Проявление жильных тел и зоны изменений.

Особое внимание на рисунке 2а привлекает центральная вытянутая субмеридиональная зона пониженных значений фазы импеданса, расположенная восточнее разлома. Зона состоит из трех сегментов, которые по субширотным разломам смещаются на 120-300 м восточнее друг относительно друга по мере движения с юга на север. С центральным сегментом связана кварцевая золоторудная жила. Её положение было известно до начала полевых работ АМТ (лето 2013). Северному и юго-западному фрагменту аномалии фазы импеданса соответствуют положения жил, определённых по результатам бурения 2014 года (после работ АМТ). Локальные положительные аномалии модуля детерминанты горизонтального теллурического тензора (Рис. 2б) также отражают в плане положение жил и зон кварц-адуляровых изменений вокруг них.

Проявление рудной зоны в геофизических полях позволяет оптимизировать буровые работы. Ширина аномалий на картах фазы импеданса (Рис. 2а) и горизонтального теллурического тензора (Рис. 2б) составляет от 200 м до 300 м. Для проектирования

разведочных скважин авторы предлагают использовать карту фазы типпера (параметр метода МВП), аномалии на которой более локальные и контрастные. При прохождении над центром аномального объекта фаза типпера меняет знак [Ermolin, et al., 2011]. На карте фазы наблюдаются зоны градиента, соответствующие положению геометрического центра аномального объекта на плане. Положение центральной части рудной жилы, проявляется на 9000 Гц (Рис. 2в), как область резкого изменения знака. Северная (опущенная) часть жильной зоны лучше проявляется на частоте 800 Гц.

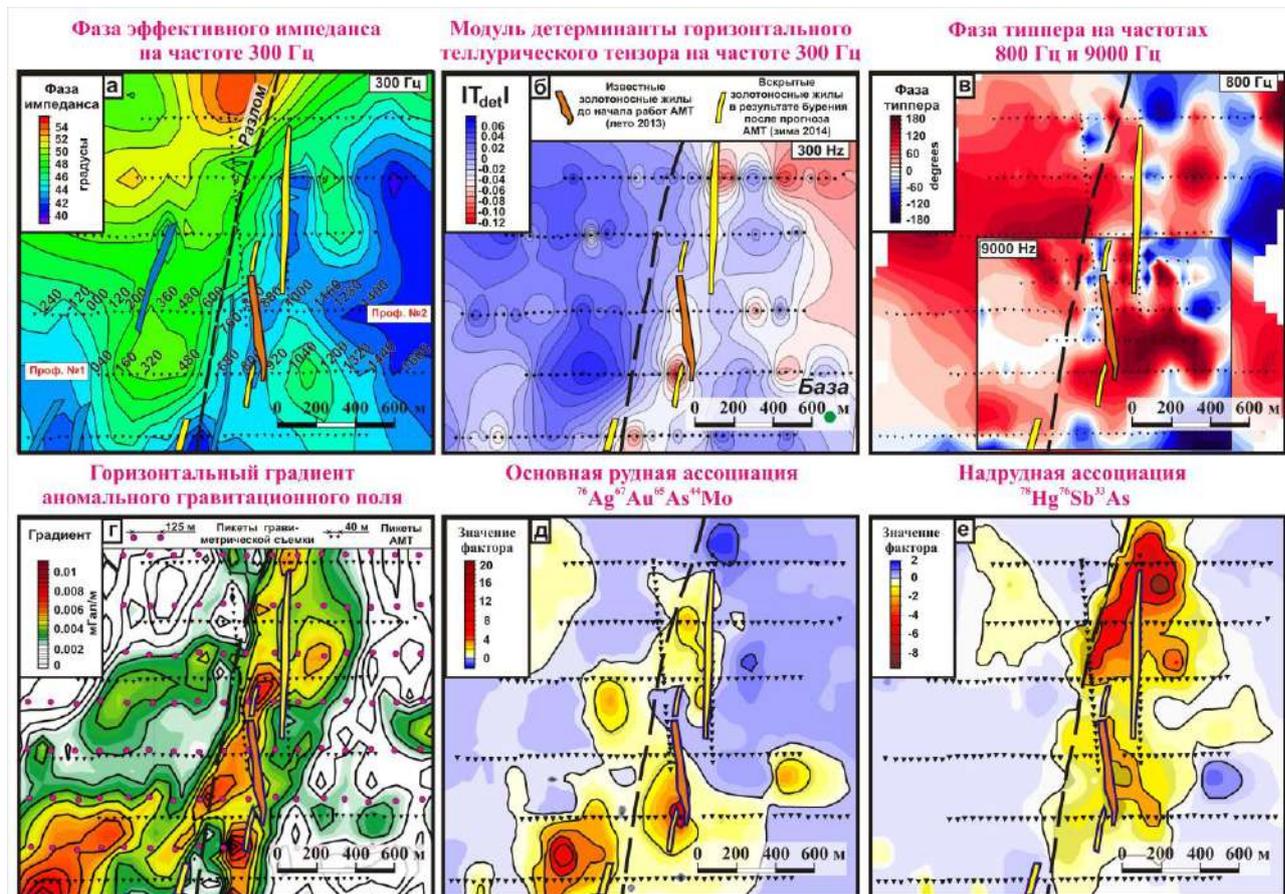
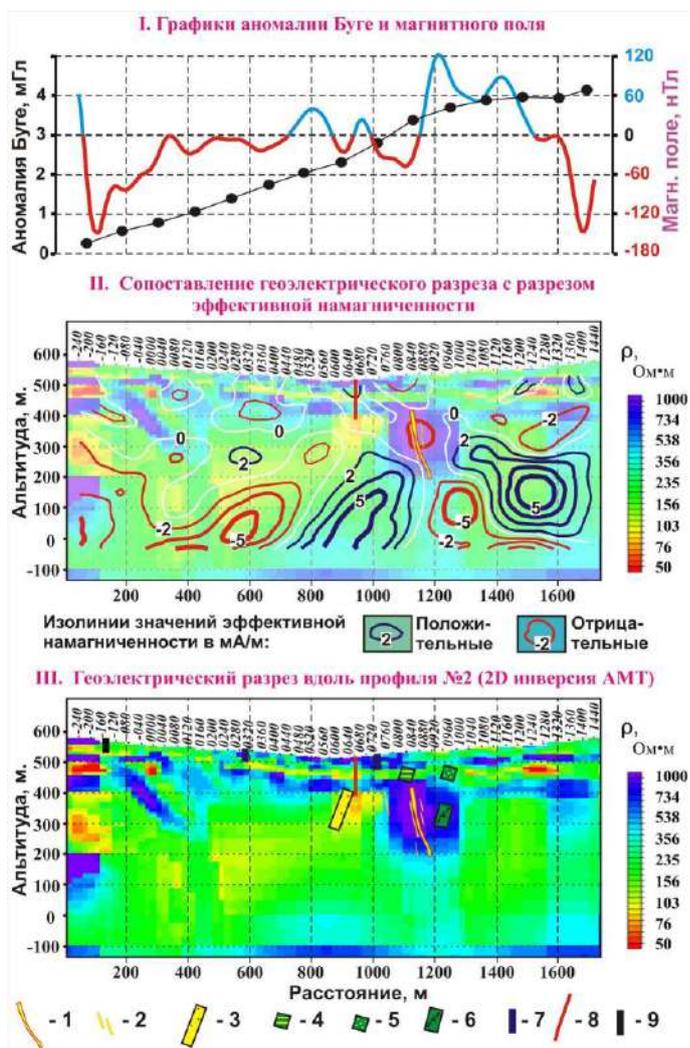


Рис 2. Карты параметров АМТ-МВП (а-в): фаза эффективного магнитотеллурического импеданса, 300 Гц (а); модуль детерминанты горизонтального теллурического тензора, 300 Гц (б); фаза типпера, 9000 Гц и 800 Гц (в). Полный горизонтальный градиент аномалии Буге (г). Результаты обработки данных литогеохимической съёмки (д, е)

Анализ графиков параметров и геоэлектрического разреза вдоль профиля АМТ-МВП №2 показан на рисунке 3. Положение зоны кварц-адуляровой минерализации проявляется на геоэлектрическом разрезе как ореол повышенных значений удельного электрического сопротивления (Рис. 3-III, сине-фиолетовая область в диапазоне пикетов 0760-1000, на высоте от 450 до 200 м). Золотоносные жилы сосредоточены в области максимальных значений удельного электрического сопротивления (фиолетовая область). Зона имеет глубинный канал, также проявляющийся как диэлектрик до глубины более 1 км. Пачки пепловых туфов, перекрывающие рудную зону, проявляются как слои пониженного удельного электрического сопротивления на высоте от 600 до 400 м.

Околорудная зона метасоматических изменений ярко отражается в аномальном магнитном поле (Рис. 3-I, красно-синяя линия). Над рудной зоной наблюдается выраженная биполярная аномалия.

На геоэлектрический разрез (Рис. 3-II) вынесены изолинии эффективной намагниченности (результаты решения обратной задачи данных наземной магнитной съёмки) красными линиями показаны отрицательные значения, а синими – положительные. Зона кварц-адуляровой минерализации месторождения (диэлектрик) проявляется как



надрудной Sb-Hg-As ассоциации. На карте (Рис. 2е)

Рис 3. Сопоставление геофизических данных.

Условные обозначения для III: литология по данным бурения (1-6): 1 - главная золотоносная жила, 2 - тонкие золотоносные жилы, 3 - пепловые туфы неизменные, 4,5 - сильно изменённые: лавы (4) туфы(5), 6 – порфирировые андезиты; Данные геологического картирования (7-9): 7 – дайки андезитовых порфиритов, 8 – разлом, 9 - контакт риолитов и андезитов.

месторождений геохимическая зональность [Sillitoe, 2010]: с юга на север прослеживается закономерная смена элементных ассоциаций: Mo±Cu (подрудная) → Au-Ag-As (рудная) → Sb-Hg (надрудная).

Физико-геологическая модель

Комплексный анализ рассмотренных выше данных показал, что рудоконтролирующий разлом и известная жильная зона мощностью 3 метра, перекрытая 100-метровым экраном, уверенно проявляются в геофизических полях.

Рудоконтролирующие разломы (границы блоков) проявляются как зоны:

- повышенного градиента гравитационного поля в редукции Буге;
- повышенного градиента фазы магнитотеллурического импеданса.

Области *кварц-адуляровых изменений* вокруг жилы проявляются как зоны:

- повышенного удельного электрического сопротивления. Зона имеет глубинный канал;

контрастная область отрицательных значений эффективной намагниченности. По аналогии со значениями удельного электрического сопротивления зона пониженных значений имеет глубинный канал и наклонена в восточном направлении.

Помимо анализа геофизических данных, авторы выполнили анализ данных геохимии.

Литогеохимическая съемка по вторичным ореолам рассеяния масштаба 1:10000 проведена на изучаемой площади до 2013 года. Обработка ее результатов выполнена авторами с помощью главных компонент факторного анализа, показавшего важнейшие геохимические ассоциации. На рисунке 2д показано распределение основной рудной Au-Ag-As-Mo ассоциации (верхние индексы у химических элементов обозначают факторную нагрузку). Полиэлементная аномалия, состоящая из трёх сегментов, фиксирует положение известных жил. Указанные аномалии подобны аномалиям фазы импеданса (Рис. 2а) и горизонтального теллурического тензора (Рис. 2б). На рисунке 2е показан параметр рудной жилы наблюдается интенсивная аномалия. Это свидетельствует о том, что рудная зона на севере находится гипсометрически ниже, чем на юге. В результате этого надрудный Sb-Hg-As ореол на севере сохранился от эрозии.

По итогам геохимических работ установлено, что на изученном месторождении наблюдается классическая для эпитермальных

- пониженных значений эффективной намагниченности;
- пониженных значений фазы магнитотеллурического эффективного импеданса;
- повышенных значений горизонтального теллурического тензора.

Маломощные жильные тела проявляются как зоны:

- высокого градиента на картах фазы типпера.

Перечисленные особенности можно назвать «геофизическими структурно-поисковыми критериями» при поиске эпитермальных золотоносных кварцевых жил в пределах изучаемого района. В результате анализа данных геохимической съемки была определена (подтверждена) классическая геохимическая зональность рудной зоны (подрудная $Mo\pm Cu \rightarrow$ рудная $Au-Ag-As \rightarrow$ надрудная $Sb-Hg$). Указанные геофизические и геохимические особенности отображают обобщенную физико-геологическую модель эпитермального кварцево-жильного LS-месторождения.

Заключение

В результате анализа данных комплекса геофизических методов и данных литогеохимической съёмки в 2013 году было предсказано северное продолжение известной рудной жилы. Прогноз был подтверждён бурением в 2014 году.

Авторами описана физико-геологическая модель эпитермального кварцево-жильного месторождения золота, которая может быть использована геологами и геофизиками для проектирования геологоразведочных работ. Для поиска золотоносных кварцевых жил в исследуемом регионе авторы предлагают следующий комплекс геофизических методов: аудиоманнитотеллурическое зондирование (АМТ), магнитовариационное профилирование (МВП), наземные гравиметрическую и магнитную съёмки. Выбранный комплекс методов изучает естественные поля и оказался весьма производительным в условиях Крайнего Севера. Он не требует привлечения большого штата сотрудников и практически не наносит вред окружающей среде. Учитывая высокую производительность наземной гравиметрической съёмки по сети 125x250 метров, последней можно покрывать обширные площади и определять общие структурные особенности района. Наземные детальную магнитную съёмку по сети 10x40 метров и работы АМТ-МВП с шагом 40 метров и расстоянием между профилями 250-400 м следует проектировать на перспективных по геохимическим данным и структурным критериям участках.

Благодарность

Авторы благодарят производственную отрасль Чукотки за возможность опубликовать результаты полевых работ.

Список литературы

- Berdichevsky, M.N. and Dmitriev, V.I.* (2008) Models and methods of magnetotellurics. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 563 p.
- Ermolin, E. Ingerov O., Ingerov I.* (2011) Mapping of vertical conductivity bodies by MVS. All-Russian school-workshop dedicated to M.N. Berdichevsky and L.L Vaniyan of electromagnetic researches of the Earth. Saint Petersburg, pp. 245-249.
- Ermolin E., Ingerov O., Savichev A.* (2014) Gold exploration in Chucotka region by using audiomagnetotellurics. 22-th EM Induction Workshop Weimar, Germany, 24-30 Aug.
- Hedenquist, J.W. Arribas, A.R. and Gonzalez-Urien E.* (2000). Exploration for Epithermal Gold Deposits. SEG Reviews, V. 13, pp. 245-277.
- Sillitoe, R.H.* (2010) Porphyry Copper Systems. Economic Geology, 105, pp. 3-41.
- Ingerov, O. et al.* (2009). Non-grounded Surface Electroprospecting Technique. 70-th EAGE annual Conference. Amsterdam #6149
- Rokityansky, I.I.* (1982). Geoelectromagnetic Investigation of the Earth Crust and Mantle. Spinger-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 378 p.