

Комплексирование метода АМТ при поиске LS-эпитермальных Au-Ag жил на Чукотке

Е.Ю. Ермолин (ООО «ДЖИ М Сервис»)

О. Ингеров («Phoenix-Geophysics ltd»)

А.А. Савичев (ООО «НОРИЛЬСКГЕОЛОГИЯ»; «Санкт-Петербургский горный университет»)

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 спутниками 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 позднемеловых лавах среднего состава (рис. 1б) и перекрыта 100-130 м толщей основных вулканитов со слоями пепловых туфов.

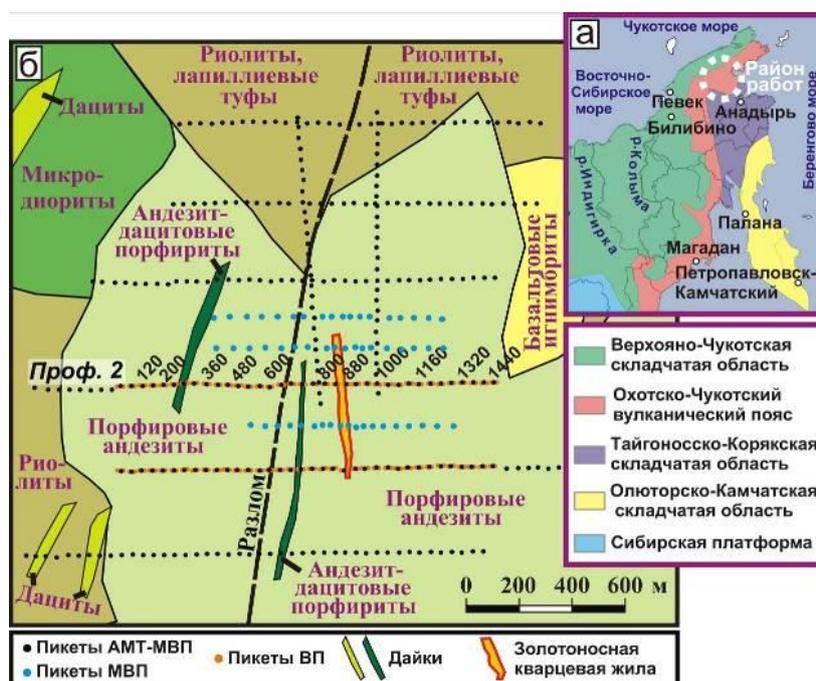


Рисунок 1 а – положение района работ на фрагменте тектонической схемы России (по Цейслер В.М). б – геологическая схема района с расположением пикетов АМТ-МВП и ВП.

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 туфвопроводников. Методика работ АМТ-МВП описана в ранних публикациях авторов (Ermolin et al. 2014, Ermolin and Ingerov. 2011). До 2013 года на изучаемой площади выполнена литогеохимическая съёмка по вторичным ореолам с шагом 100x20 метров и наземная магнитная съёмка с шагом 100x50 метров. В 2014-2015 гг район работ был покрыт авторами гравиметрической съёмкой с шагом 125x250 метров.

Геологическая модель и предполагаемые физические свойства

Прежде чем говорить о применимости геофизических методов необходимо чётко понимать геологическую модель изучаемого объекта и оценить его физические свойства. В настоящий момент принятая нами обобщенная геологическая модель эпitherмального LS-месторождения может быть описана следующим образом (Рис. 2):

- 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 определённом расстоянии от источника обязательно наличие блока крепких пород, чтобы рудоносный флюид кристаллизовался в узкой зоне, а не рассеялся в пористых породах;
- эпitherмальные кварцевые жилы сопровождаются зоной гидротермально-метасоматических изменений (кварц-адуляровая минерализация и боковые зоны пропилитов).



По Hedenquist et al. 2000, модифицированная Ермолин и Савичев 2018

Рисунок 2 Схематическая геолого-генетическая модель эпitherмального месторождения.

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 инвариантного импеданса является наиболее устойчивым параметром в методе АМТ. На рисунке 3а показана карта этого параметра на частоте 300 Гц. Низкие значения фазы соответствуют высокому удельному сопротивлению (синий цвет), а высокие – низкому сопротивлению (зеленый и желтый цвет). Изучаемая территория делится градиентной зоной субмеридионального простирания на две примерно равные части – восточную (высокоомную) и западную (низкоомную). Эта градиентная зона маркирует положение контакта двух крупных блоков и соответствует разлому. Указанная граница наблюдается в виде градиентной зоны также на картах горизонтального электрического тензора (Рис. 3б) и амплитуды типпера (параметр МВП) на рисунке 3в. Данный разлом ярко проявляется на карте полного горизонтального градиента аномалии Буге (трансформация данных наземной гравиразведки) как контрастная положительная аномалия (Рис. 4б). В 350-400 м восточнее наблюдается ещё одна зона повышенного градиента аномалии Буге. Исходя из рисунка 4б, 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 4б имеют азимут от -10 до 30 градусов.

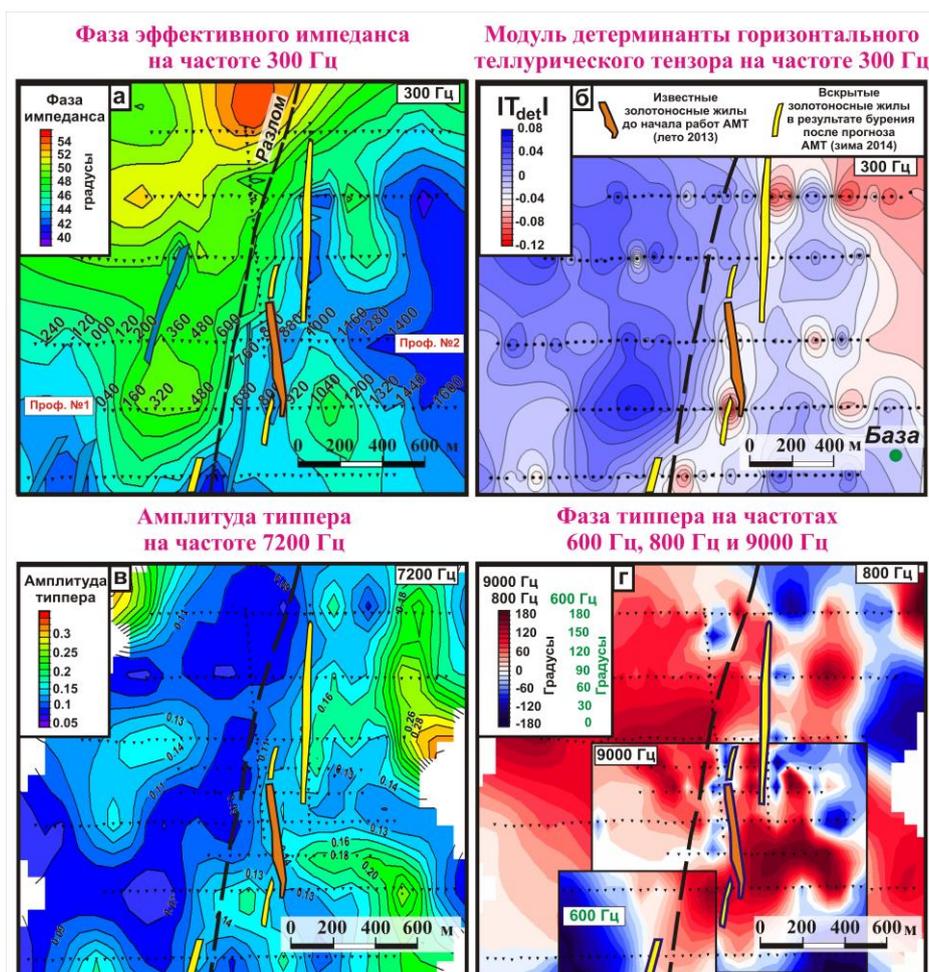


Рисунок 3 Карты параметров АМТ-МВП: фаза эффективного магнитотеллурического импеданса, 300 Гц (а); модуль детерминанты горизонтального теллурического тензора, 300 Гц (б); амплитуда типпера, 7200 Гц(в) и фаза типпера, 9000 Гц, 800 Гц и 600 Гц(г).

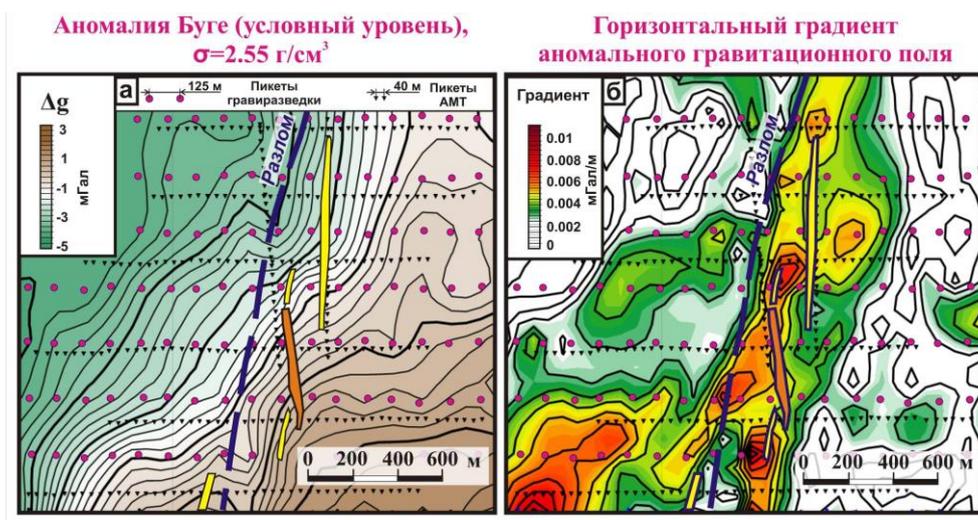


Рисунок 4 а - Карты аномального гравитационного поля в редукции Буге (плотность промежуточного слоя $2,55 \text{ г/см}^3$). Изолинии проведены через $0,2 \text{ мГал}$. б – карта полного градиента аномалии Буге.

II. Проявление жильных тел и зоны изменений.

Особое внимание на рисунке 3а 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. 3б) 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. 3а) и горизонтального теллурического тензора (Рис. 3б) 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 (Egmlin 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. 3г), как область резкого изменения знака. Северная (опущенная) часть жильной зоны лучше проявляется на частоте 800 Гц.

На кривых АМТ-МВП можно наблюдать наличие рудоконтролирующего разлома, так и саму зону изменений. Типичные кривые кажущегося сопротивления, фазы импеданса, амплитуды и фазы типпера, показаны на рисунке 5. В целом для всего профиля характерны хорошее качество кривых АМТ-МВП и закономерное изменение их формы от точки к точке. Фазовые кривые АМТ вполне соответствуют амплитудным, что свидетельствует об отсутствии контрастных проводящих неоднородностей. Данный факт подтверждается тем, что кривые амплитуды типпера в частотном диапазоне ниже 1000 Гц практически не изменяются.

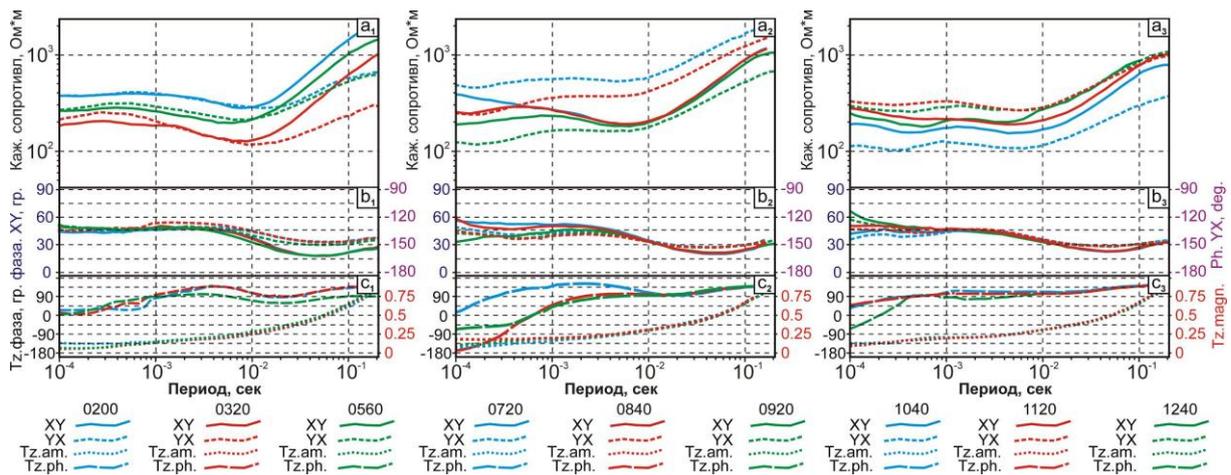


Рисунок 5 типичные кривые АМТ-МВП профиля № 2, расположенные восточнее (индекс 1), вблизи (индекс 2) и западе жилой зоны. Типичные кривые АМТ(a,b): кажущегося сопротивления (a) и фазы импеданса (b) в направлении север-юг (XY) показаны сплошной линией, в направлении запад-восток (YX) показаны пунктирной линией. Номера пикетов показаны под осями периодов.

Кривые кажущегося сопротивления (ρ) в западном блоке (Рис. 5a₁) в диапазоне частот от 10000 Гц до 1000 Гц имеют близкую к горизонтальной левую ветвь на уровне 200-300 Ом·м. Меридиональные (ρ_{xy}) и широтные (ρ_{yx}) кривые в основном конформны. Небольшие перегибы на кривых говорят о чередовании высокоомных лав андезито-базальтов и проводящих прослоев их пепловых туфов. Небольшое расхождение ρ_{xy} и ρ_{yx} на кривой 0320 объясняется влиянием крутопадающей дацитово-дайки. Далее следует пологая нисходящая ветвь и минимум в районе 100 Гц.

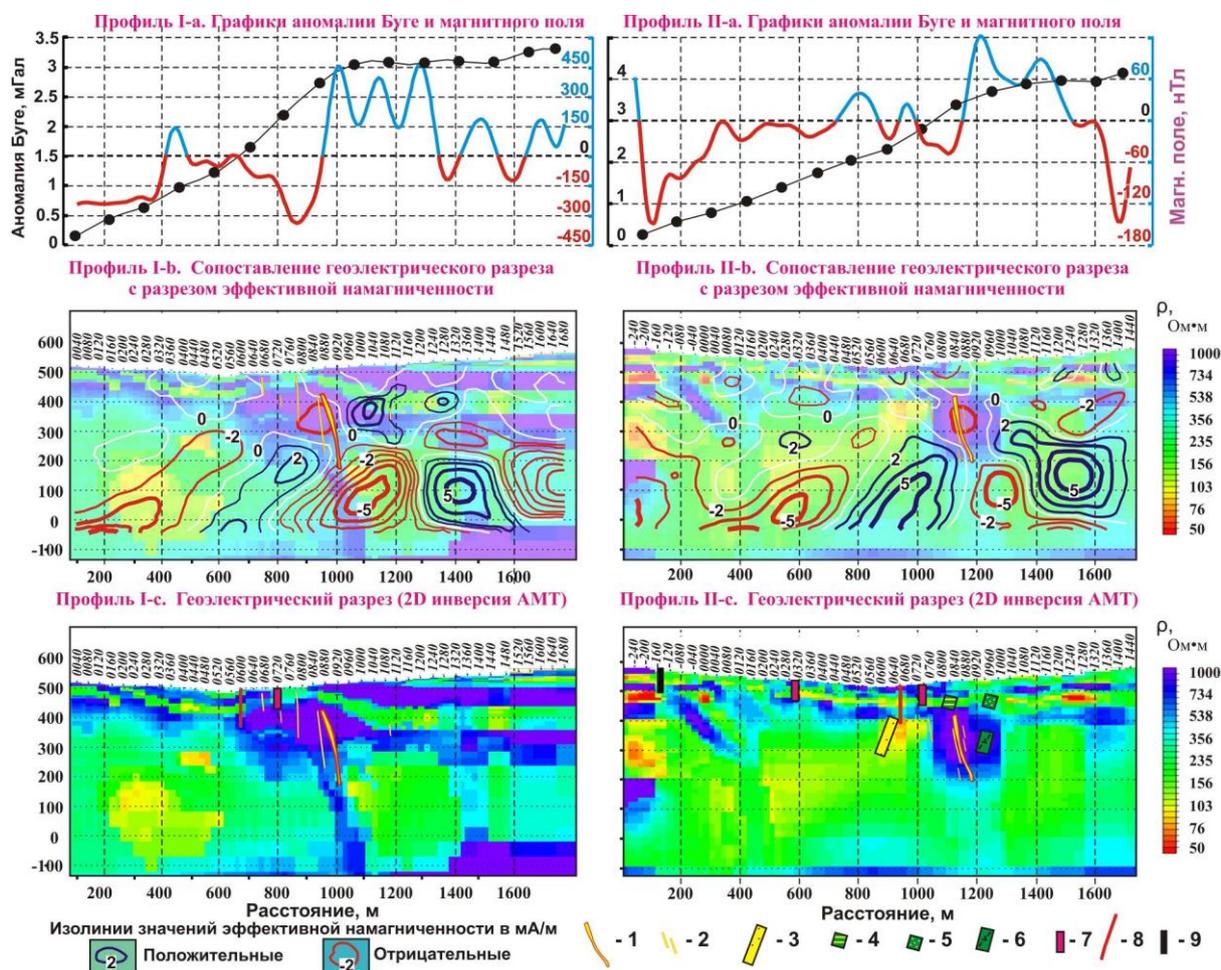
Восточнее разлома минимум кривых ρ (Рис. 5a₂, 5a₃) смещается в область более высоких частот (150 Гц), что свидетельствует об увеличении сопротивления разреза. В центральной колонке (Рис. 5a₂) наблюдается самое большое расхождение ρ_{xy} и ρ_{yx} кривых АМТ в диапазоне от 10000 до 100 Гц. Для восточного блока (Рис. 5a₃) характерны очень выдержанные по форме кривые АМТ-МВП, различие отмечается только для самых высоких частот (более 1000 Гц). Наибольший интерес представляет изменение формы фазовых кривых типпера. Западные золотоносной кварцевожильной зоны высокочастотные части кривых фазы типпера имеют положительные значения, а восточнее – отрицательные.

Ниже 100 Гц для всего профиля на кривых АМТ наблюдаются восходящие ветви и расхождение кривых ρ_{xy} (более крутые) и ρ_{yx} (более пологие). Этот эффект расхождения максимален на западе профиля и минимален в восточной части.

Преимущественное простирание закартированных геологических структур в азимутах от -10 до +10 градусов позволяет принять ρ_{xy} за ТЕ-моду, а кривую ρ_{yx} за ТМ-моду в частотном диапазоне от 10000 Гц до 50 Гц при 2D инверсии. Для данного решения авторы использовали анализ параметра Skew и карты амплитудных полярных диаграмм. 2D инверсия (построение геоэлектрических разрезов) выполнялась с использованием сглаженной инверсии R.L. Mackie (2001). Использовались амплитудные и фазовые кривые АМТ: продольные (азимут 0 градусов) и поперечные (азимут 90 градусов), в частотном диапазоне от 10 000 Гц до 50 Гц. Типпер использовался в частотном диапазоне от 10000 до 3000 Гц. Для каждого профиля было выполнено более 150 инверсий с более чем 50 итераций каждая, что позволило получить устойчивые 2D модели с погрешностью 0,9-1,3 %.

Анализ графиков параметров и геоэлектрического разреза вдоль профиля АМТ-МВП №2 показан на рисунке 6. Положение зоны кварц-адуляровой минерализации проявляется на

геоэлектрическом разрезе как ореол повышенных значений удельного электрического сопротивления (Рис. 6-с), сине-фиолетовая область в диапазоне пикетов 0760-1000, на высотах 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.



Литогеохимическая съемка по вторичным ореолам рассеяния масштаба 1:10000 проведена на изучаемой площади до 2013 года. Моноэлементные карты распределения (Рис. 7) показывают, что на юге изученной площади присутствуют субизометричные аномалии калия, фиксирующие зоны ранней калишпатизации. С ними пространственно связаны линейные субмеридиональные зоны повышенных содержаний молибдена. Эти два элемента накапливаются в дозолоторудную стадию и фиксируют подрудный уровень изменений, который более проявлен на южном фланге месторождения. На моноэлементной карте распределения золота наблюдается ряд точечных аномалий, которые отображают далеко не все известные жилы. Более ярко эпитермальное оруденение отобразилось в полях рассеяния мышьяка, который накапливается как на юге продуктивной зоны, так и на ее севере, неплохо фиксируя положение эпитермальных жил. Эти два элемента (Au и As) соответствуют собственно золоторудной минерализации продуктивной стадии. На севере аномалиям мышьяка сопутствуют контрастные ореолы сурьмы и ртути, которые соответствуют пострудной, более низкотемпературной минерализации. Эти элементы фиксируют своим появлением надрудный уровень. Таким образом, выявляется геохимическая зональность месторождения: на юге развиты Mo±Cu с зонами калиевого метасоматоза, в центре - Au-Ag-As, на севере - Hg-Sb.

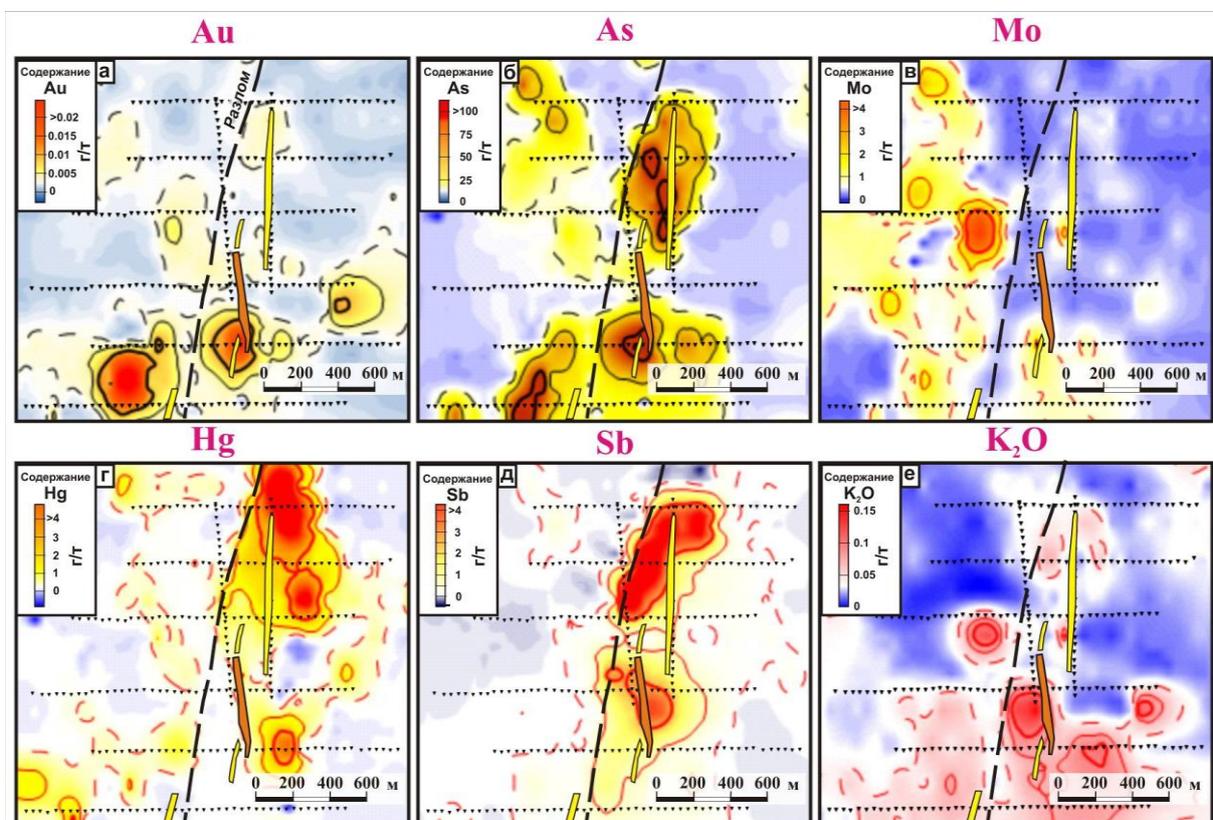


Рисунок 7 Положение известных золотоносных жил совмещенное с моноэлементными картами распределения химических элементов

Более четко зоны развития разных минеральных ассоциаций выявляются при геометризации результатов факторного анализа. На рисунке 8а 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. 3а) и горизонтального теллурического тензора (Рис. 3б). На рисунке 8б показан параметр надрудной Sb-Hg-As ассоциации. На карте (Рис. 8б) северо-восточнее известной до 2013 года 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.

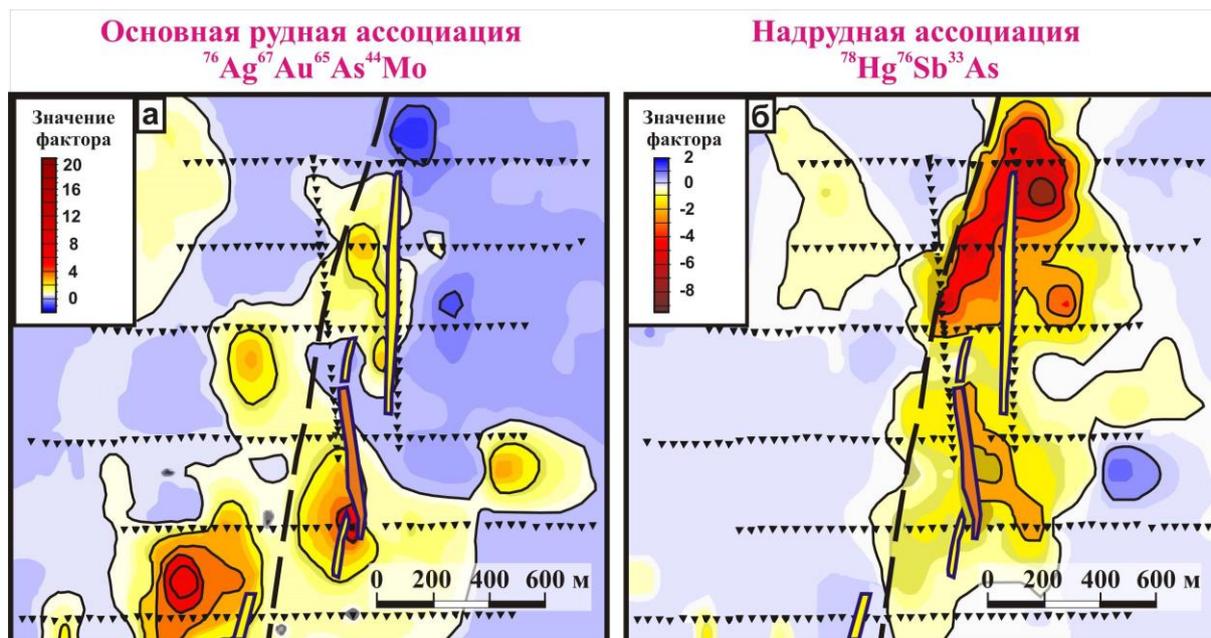


Рисунок 8 Результаты обработки данных литогеохимической съёмки по вторичным ореолам

По итогам геохимических работ установлено, что на изученном месторождении наблюдается классическая для эпитермальных месторождений геохимическая зональность (Sillitoe, 2010): с юга на север прослеживается закономерная смена элементных ассоциаций: $\text{Mo}\pm\text{Cu}$ (подрудная) \rightarrow Au-Ag-As (рудная) \rightarrow Sb-Hg (надрудная).

Геофизические структурно-поисковые критерии

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;
- повышенного градиента горизонтального теллурического тензора;
- границы областей с разной конфигурацией изолиний горизонтального теллурического тензора с двух сторон от разлома;

Области кварц-адуляровых изменений вокруг жилы проявляются как зоны:

- повышенного удельного электрического сопротивления. Зона имеет глубинный канал;
- 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 окруженные аномалиями повышенного удельного электрического сопротивления по данным фазы инварианта импеданса, горизонтального теллурического тензора.

Перечисленные особенности можно назвать «геофизическими структурно-поисковыми критериями» при поиске эпитермальных золотоносных кварцевых жил в пределах изучаемого района. В результате анализа данных геохимической съёмки была определена (подтверждена)

классическая геохимическая зональность рудной зоны (подрудная $\text{Mo}\pm\text{Cu}$ → рудная Au-Ag-As → надрудная Sb-Hg). Указанные геофизические и геохимические особенности отображают обобщённую 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. Основную роль в принятии решения сыграли результаты применения метода АМТ-МВП (5-компонентные измерения переменного естественного EM поля Земли) и данные геохимии, обработанные с использованием факторного анализа.

Авторами выделены «геофизические структурно-поисковые критерии», которые могут быть использованы геологами и геофизиками для проектирования геологоразведочных работ. Для поиска LS-эпитермальных золотосеребряных кварцевых жил в исследуемом регионе предлагается следующий комплекс геофизических методов: аудиоманнителлурическое 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 вреда окружающей среде. Учитывая высокую производительность наземной гравиметрической съёмки по сети 125x250 метров, последней можно покрывать обширные площади и определять общее 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. Данные геохимии следует обрабатывать с использованием факторного анализа.

Благодарность

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

Библиография

Berdichevsky, M.N. and Dmitriev, V.I. [2008] Models and methods of magnetotellurics. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 563.

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, 245-249.

Ermolin, E., Savichev, A., Ingerov, I. [2016] Additional exploration of gold deposit in Chukotka by АМТ and MVP. Proceedings of the Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems, SAGEEP.

Ermolin, E., Ingerov, O., Ingerov, I. [2014]. Evaluation of conductive 3-D ore bodies parameters using tipper frequency response functions. 76th European Association of Geoscientists and Engineers Conference and Exhibition 2014: Experience the Energy - Incorporating SPE EUROPEC 2014.

Ermolin E., Ingerov O., Savichev A. [2014] Gold exploration in Chucotka region by using audiomagnetotellurics. 22-th EM Induction Workshop Weimar, Germany.

Ermolin, E., Ingerov, O. [2011] Results of AMT survey at Patomsky Crater. 73rd European Association of Geoscientists and Engineers Conference and Exhibition 2011: Unconventional Resources and the Role of Technology. Incorporating SPE EUROPEC 2011, 6, 4325-4329.

Hedenquist, J.W. Arribas, A.R. and Gonzalez-Urien E. [2000]. Exploration for Epithermal Gold Deposits. SEG Reviews, V. 13, 245-277.

Sillitoe, R.H. [2010] Porphyry Copper Systems. Economic Geology, 105, 3-41.

Ingerov, O. L. Fox, A. Golyashov and A. Colin [2009]. Non-grounded Surface Electroprospecting Technique. 70-th EAGE annual Conference. Amsterdam #6149.

Rodi W, Mackie R L. [2001]. Nonlinear conjugate gradients algorithm for 2-D magnetotelluric inversion. Geophysics. 174-187

Rokityansky, I.I. [1982]. Geoelectromagnetic Investigation of the Earth Crust and Mantle. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 378.

Контактная информация

E. Ermolin (Ermolin_stud@list.ru)

O. Ingerov (Olexandr_ingerov@yahoo.ca)

A.A. Savichev (a_savichev@mail.ru)