

СПЕКТРАЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ВЫЗВАННОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ ПОРОД РУДОПРОЯВЛЕНИЯ ЗОЛОТА ЯСНОЕ (П-В ТАЙМЫР): СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ПОЛЕВЫХ И ЛАБОРАТОРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Гурин Григорий Владимирович^{1,2}, Титов Константин Владиславович¹, Пантеев Игорь Андреевич^{1,2}

¹Санкт-Петербургский Государственный Университет

²ООО «НПП ВИРГ-Рудгеофизика»

Введение

Метод вызванной поляризации (ВП) является одним из основных методов рудной геофизики на протяжении многих лет. Его преимуществом является возможность поиска пород с включениями электропроводящих минералов (ЭМ). Известно, что величина аномалий поляризуемости определяется как структурно-текстурными особенностями породы, так и технологическими параметрами измерений, поэтому геологические тела, сложенные породами различного состава и строения, могут создавать аномалии одинаковой интенсивности. В таких случаях требуется разделить аномалии по «геологической природе» (например, выбрать связанные с рудной минерализацией). В благоприятных случаях эта задача решается на основе изучения временных характеристик ВП (ВХ-ВП), что часто называют спектральной ВП. Однако при решении производственных задач ВХ-ВП отобранных образцов и пород в естественном залегании не рассматриваются. В результате теоретические и лабораторные исследования ВП пород и руд оказываются «оторванными» от потребностей производственных компаний. Часто применимость разрабатываемых моделей ВП пород и руд для геологической интерпретации «полевых» данных ВП вызывает сомнения у геофизиков-практиков. С одной стороны, это связано со сложностью физико-химических моделей ВП, с другой стороны — их плохой применимостью для практического использования. Вследствие этого внедрение в «практику геологоразведочных работ» современных достижений теории ВП практически не происходит.

В настоящей работе мы приводим сопоставление результатов изучения ВХ-ВП пород рудопроявления золота Ясное (п-ов Таймыр) по данным электропрофилирования ВП («в естественном залегании») с данными лабораторных измерений ВП на образцах горных пород. Мы показываем, что РВР пород, измеренные в «поле» и «лаборатории» оказываются сопоставимы. Кроме того, мы тестируем применимость теоретических моделей ВП пород с включениями электропроводящих минералов (ЭМ) для анализа лабораторных измерений ВП на образцах горных пород, охарактеризованных на основе компьютерной рентгеновской микротомографии (μ -КТ). В работе демонстрируется, что гранулярные модели ВП пород с включениями ЭМ плохо применимы для интерпретации лабораторных измерений ВП для низкопористых пород.

Геолого-геофизическая характеристика рудопроявления золота Ясное

Рудопроявление золота Ясное расположено в пределах Светлинской площади Верхнеленинградского золоторудного узла полуострова Таймыр. Оруденение золото-сульфидно-кварцевого типа локализовано в углеродистых вулканогенно-карбонатно-терригенных формациях позднего докембрия, прорванных нижнерифейскими силлами габбро-долеритов. Рудная минерализация, представлена вкрапленным и прожилково-вкрапленным пиритом, сопровождается кварцевым, карбонат-кварцевым прожилкованием, серицитизацией, карбонатизацией, хлоритизацией пород. Золотоносные минерализованные зоны приурочены к линейным ореолам березитизации кварц-серицит-карбонат-сульфидного состава в телах габбро-долеритов и вмещающих их углеродистых карбонатно-терригенных пород.

Материалы и методы

Для выявления особенностей отражения золоторудных зон вдоль канавы, вскрывшей рудные тела рудопроявления Ясное, в полевых условиях проведены параметрические измерения: магнитная съемка, электропрофилирование методом ЕП (способ потенциала) и ВП (установка градиента). На отдельных точках дополнительно проведено изучение ВХ-ВП. Измерения ВП проведены четырехэлектродной установкой (A20N5M20B) с помощью комплекта аппаратура АИЭ-2. Диапазон измерения кривых спада поляризуемости составлял 20 мс – 32 с (использовано три токовых режима, различающихся длительностью импульсов тока — 1, 8, 32 с).

Измерения ВП выполнены на коллекции из 37 образцов (кубики с размером ребра 2.5 мм), разделенных на шесть групп, отвечающих основным типам пород рудопроявления Ясное: габбро-долериты, хлорит-актинолитовые сланцы, карбонатные породы (известняки и мраморы), графитизированные сланцы, березитизированные сланцы и габбро-долериты, березиты.

Лабораторные измерения ВП проведены во временной области с помощью четырехэлектродной лабораторной установки (описание установки см. (Gurin et al., 2018)) в диапазоне 1 мс — 32 с. Использован измеритель АИЭ-2 и лабораторный генератор малых токов. Описание аппаратуры, методики выполнения измерений ВП и обработки данных рассмотрены в работе (Gurin et al., 2013).

По результатам анализа РВР образцов сформирована эталонная коллекция образцов (9 шт.), включающая представительные образцы из каждой группы пород. Образцы различались: степенью изменения гидротермально-метасоматическими процессами, типом распределения (вкрапленный и прожилково-вкрапленный) и составом ЭМ (пирит, графит, пирит+графит).

Для оценки текстурно-структурных особенностей образцов эталонной коллекции выполнена μ -КТ на рентгеновском микротомографе SkyScan 1172 (разрешение – 10 мкм).

Сопоставление РВР пород по результатам измерений ВП в полевых и лабораторных условиях

На рисунке 1 приведено сопоставление РВР, восстановленных по результатам полевых ($Z_F(\tau)$) и лабораторных ($Z_L(\tau)$) измерений ВП, для обобщенных групп пород рудопроявления золота Ясное. На рисунке 1а, 1б сопоставлены РВР габбро-долеритов и кварц-хлорит-актинолитовых сланцев, вмещающих золоторудные тела. По интенсивности процессов поляризации $Z_F(\tau)$ и $Z_L(\tau)$ сопоставимы, а по форме — различны (для $Z_L(\tau)$ характерна более высокая поляризация пород на ранних временах). Установленные различия в РВР могут быть обусловлены разными режимами измерений ВП (время начала измерений кривых $\eta(t)$ в «поле» составило 20 мс, а в «лаборатории» — 0.2 мс). На рисунке 1с, 1d сопоставлены РВР березитизированных пород, различающихся интенсивностью изменений. В отличие от вмещающих пород РВР березитизированных пород содержат интенсивный пик, максимум которого расположен в диапазоне 0.5 - 2 с. Форма и положение пика в $Z_F(\tau)$ и $Z_L(\tau)$ совпадают удовлетворительно, но интенсивность «фоновой поляризации» оказывается различной (для $Z_L(\tau)$ она выше). На рисунке 1е, 1f сопоставлены РВР в различной степени графитизированных пород. По сравнению с габбро-долеритами и кварц-хлорит-актинолитовыми сланцами в РВР графитизированных пород преобладают процессы ВП с большими временами релаксации ($\tau > 10$ с) — «J-образный» тип РВР. Для слабо графитизированных карбонатных пород $Z_F(\tau)$ и $Z_L(\tau)$ совпадают удовлетворительно как по форме, так и по интенсивности «фоновой поляризации». Для графитизированных пород $Z_F(\tau)$ и $Z_L(\tau)$ имеют сопоставимую форму, но различаются интенсивностью «фоновой поляризации» (для $Z_L(\tau)$ она выше).

В целом, РВР, восстановленные по результатам полевых и лабораторных измерений ВП, оказываются сопоставимы по форме и положению основных пиков. Таким образом, дифференциация пород по составу и текстурно-структурным особенностям, выполненная на

основе Дебаевской декомпозиции данных электропрофилирования ВП подтверждена лабораторными измерениями.

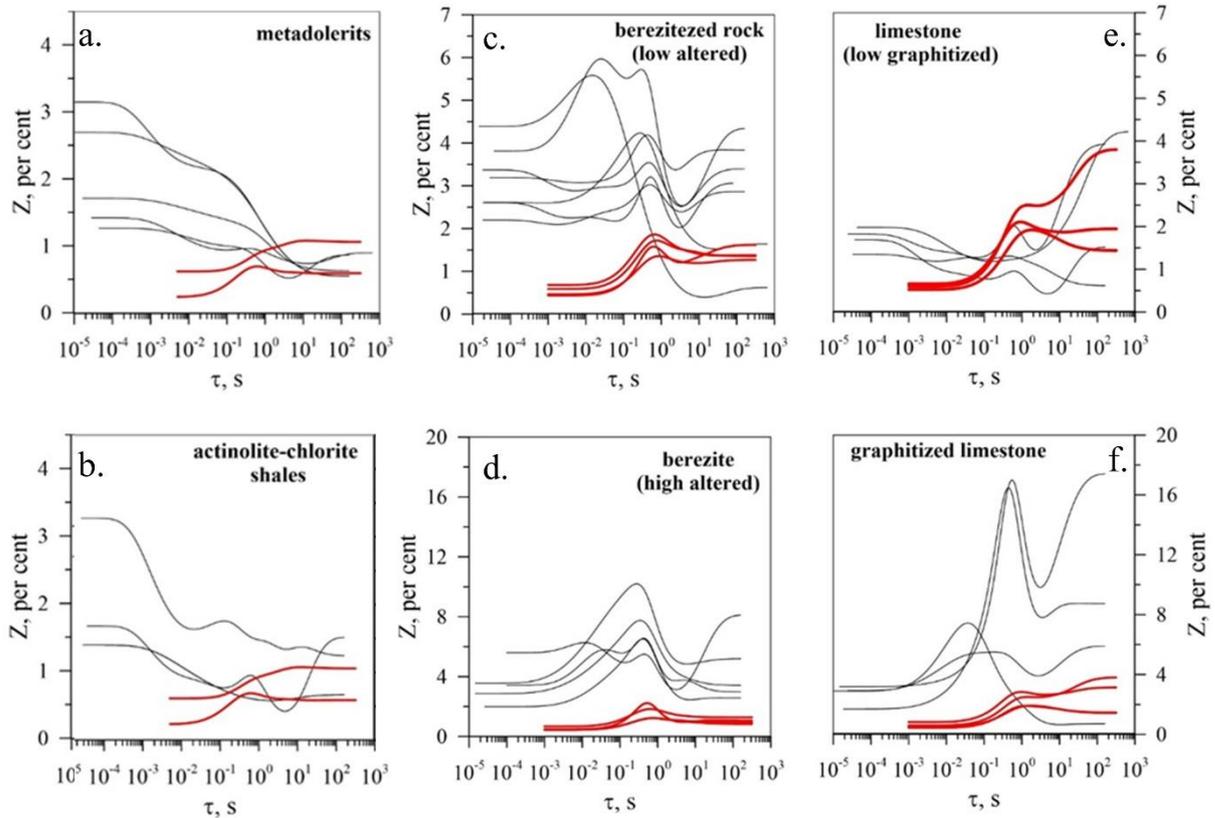


Рисунок 1. Сопоставление РВР, восстановленных по результатам полевых (красные линии) и лабораторных (черные линии) измерений.

Однако «фоновая поляризация» пород при измерении ВП на образцах «в лаборатории» оказывается выше, чем пород в естественном залегании («в поле»). Различие в интенсивности «фоновой поляризации» в первую очередь связано с особенностями создания поляризирующего поля и перераспределения долей тока в поровом пространстве пород в естественном залегании и образце. В полевых условиях плотность тока, протекающего через низкопористые породы, примерно на порядок меньше (около 0.01 – 1 мкА/см²), чем при лабораторных измерениях (около 1 – 5 мкА/см²). Увеличение плотности тока, протекающего в порах, заблокированных ЭМ, приведет к росту интенсивности поляризации пород (т.к. смещение межфазного потенциала относительно его равновесного состояния окажется больше). Отмеченная особенность ВП пород характерна для капиллярных моделей, изучение которых только начинается.

Сопоставление данных μ -КТ и ВП

Для каждого образца проводилось сравнение РВР, восстановленных по результатам лабораторных измерений ВП ($Z_{IP}(\tau)$) и μ -КТ ($Z_{CT}(\tau)$). Для образцов с включениями пирита РВР можно представить в виде суперпозиции двух РВР, характеризующих ВП матрицы ($Z_m(\tau)$) и включений пирита ($Z_{Py}(\tau)$):

$$Z_{CT}(\tau) = Z_{Py}(\tau) + Z_m(\tau). \quad (7)$$

Расчет $Z_{Py}(\tau)$ по данным μ -КТ (используя распределения $r_{Py}(V_{Py})$) выполнен на основе суперпозиции моделей Коул-Коул (Pelton et al., 1978). В качестве $Z_m(\tau)$ использовалось осредненное РВР образцов, содержащих малое количество ЭМ. Методика расчета $Z_{CT}(\tau)$ детально описана в работе (Gurin et al., 2018).

Для образцов 2, 3, 7 установлено хорошее совпадение $Z_{IP}(\tau)$ и $Z_{CT}(\tau)$. Различия между $Z_{IP}(\tau)$ и $Z_{CT}(\tau)$ на ранних временах могут быть обусловлены недоучетом поляризации матриц.

Для образцов 1, 6 стационарная поляризуемость оказывается меньше $M^i(\xi)$, а образцов 4, 5, 8, 9, 10 — больше. Согласно (Gurin et al., 2015; Revil et al., 2015) стационарная поляризуемость породы зависит от: M_m , пассивации включений ЭМ (Gurin et al., 2019a), формы и ориентировки поляризующего поля (Gurin et al., 2021)). Образцы эталонной коллекции обладают низкой пористостью, вследствие чего включения пирита в них должны быть частично или полностью пассивированы, а интенсивность их поляризации меньше (Gurin et al., 2019a). Именно пассивацией включений пирита можно объяснить установленное расхождение между $Z_{IP}(\tau)$ и $Z_{CT}(\tau)$ для образца 1.

Согласно расчетам повышенная M образцов 4, 5, 8 может быть объяснена отклонением формы включений ЭМ от изометричной. Однако «сплюсненные» включения пирита по данным μ -КТ установлены лишь в образце 5 (см. Рис. 2). Для образца 5 удовлетворительное совпадение $Z_{IP}(\tau)$ и $Z_{CT}(\tau)$ можно обеспечить, изменяя степень сжатия включений пирита до 1/10 (см. пунктирные линии на Рис. 2).

В образцах 4, 8, 10 преобладают включения пирита изометричной формы. В качестве примера на рисунке 2 приведены данные μ -КТ для образца 4. Таким образом, объяснить повышенную стационарную поляризуемость образцов влиянием формы включений ЭМ не удастся. Изменение $Z_m(\tau)$ также не позволяет получить удовлетворительного совпадения $Z_{IP}(\tau)$ и $Z_{CT}(\tau)$. Таким образом, все известные ранее параметры, определяющие интенсивность поляризации пород с включениями ЭМ, не могут быть использованы для удовлетворительного объяснения завышенной интенсивности поляризации включений пирита в образцах 4, 5, 8 и 10. Мы считаем, что выявленные расхождения между $Z_{IP}(\tau)$ и $Z_{CT}(\tau)$ обусловлены плохой применимостью гранулярных моделей ВП к породам с низкой пористостью.

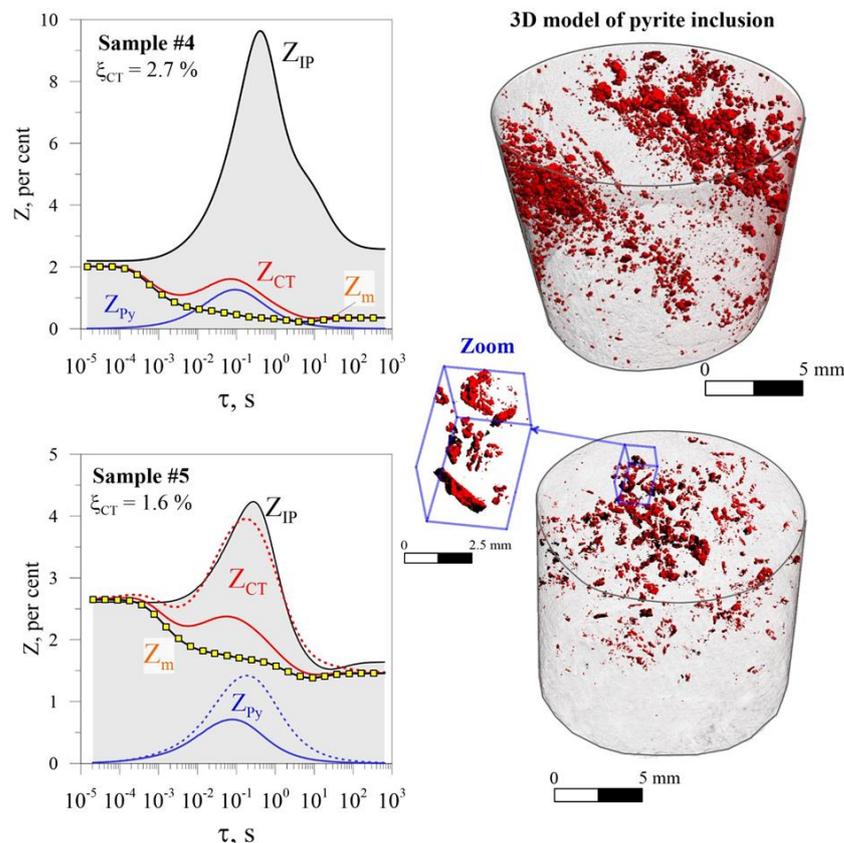


Рисунок 2. Сопоставление РВП образцов 4, 5 рассчитанных по данным μ -КТ и ВП.

Пунктирными линиями показаны РВП рассчитанные для случая сжатых включений.

Заключение

Выполненное на основе анализа ВХ-ВП данных электропрофилирования разделение пород в естественном залегании по составу, типу распределения сульфидов и степени

изменения находится в хорошем соответствии с результатами лабораторных работ. Мы показали, что РВР, восстановленные по результатам измерений ВП в полевых и лабораторных условиях оказались сопоставимы по форме. Установленные различия в интенсивности «фоновой поляризации» пород мы объясняем особенностями создания поляризующего поля и перераспределения тока в поровом пространстве в масштабе «образца» и «горного массива».

На основе сопоставления РВР, восстановленных по результатам измерений ВП и μ -КТ, выявлены ограничения гранулярных моделей ВП пород для интерпретации лабораторных измерений ВП на низко пористых образцах. Мы полагаем, что разработка капиллярных моделей ВП пород позволит устранить выявленные различия между теоретическими представлениями и экспериментальными данными.

Благодарность

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ-DFG № 20-47-04402 «Развитие теории вызванной поляризации применительно к поискам месторождений стратегического сырья».

Список литературы

1. Gurin, G., Tarasov, A., Ilyin, Yu., and Titov, K. [2013] Time domain spectral induced polarization of disseminated electronic conductors: laboratory data analysis through the Debye decomposition approach. *Journal of Applied Geophysics*, 98, 44-53, doi: 10.1016/j.jappgeo.2013.07.008.
2. Gurin, G., Titov, K., Ilyin, Yu., and Tarasov, A. [2015] Induced polarization of disseminated electronically conductive minerals: a semi-empirical model. *Geophysical Journal International*, 200, 1555-1565. doi: 10.1093/gji/ggu490.
3. Gurin, G., Titov, K., & Ilyin, Y. [2019a] Induced polarization of rocks containing metallic particles: Evidence of passivation effect. *Geophysical Research Letters*, 46. 10.1029/2018GL080107.
4. Gurin, G., Tarasov, A., Titov, K. [2019b], Spectral characteristics of Time-Domain Induced Polarization in mineral prospecting. EAGE. Engineering and Mining Geophysics 2019 15th Conference and Exhibition, Extended Abstracts, p.1 - 11.
5. Gurin, G., Titov, K., Ilyin, Yu. and Fomina, E. [2021a] Spectral induced polarization of anisotropic rocks with electronically conductive inclusions: Laboratory study of synthetic models. *Geophysical Journal International*, 224 (2), 871-895. doi:10.1093/gji/ggaa480.
6. Komarov, V.A. [1980]. *Electrorazvedka metodom vyzvannoi polarizatsii*. Leningrad (In Russian).
7. Pelton, W.H., Ward, S.H., Halof, P.G., Sill, W.R. and Nelson, P.H. [1978] Mineral discrimination and removal of inductive coupling with multifrequency IP. *Geophysics*, 43, p. 588–609. doi:10.1190/1.1440839.
8. Revil, A., Sleevi, M.F. and Mao, D. [2015] Induced polarization response of porous media with metallic particles — Part 1: A theory for disseminated semiconductors. *Geophysics*, 80, p. D525–D538, doi: 10.1190/GEO2014-0577.1.
9. Tarasov, A., and Titov, K. [2007] Relaxation time distribution from time domain induced polarization measurements. *Geophysical Journal International*, 170, p. 31– 43. doi:10.1111/j.1365-246X.2007.03376.x.