



ПЕТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОРОД МАЛЕТОВЯЯМСКОГО ЗОЛОТОРУДНОГО ПОЛЯ

Приведены результаты лабораторно-аналитических работ по изучению петрофизических свойств 108 образцов пород, распространённых в пределах Малетояямского золоторудного поля. Экспериментальные работы проведены в лаборатории кафедры геофизики Института наук о Земле Санкт-Петербургского государственного университета в 2017 году. Определялись следующие параметры: общая и минеральная плотность, пористость, удельное электрическое сопротивление, поляризуемость и магнитная восприимчивость. На основе анализа полученных данных: дана петрофизическая характеристика пород, различающихся интенсивностью метасоматического изменения, установлены связи между петрофизическими параметрами; проведена оценка информативности геофизических методов для решения поисковых задач.

1. Введение

Петрофизика — основа геологической интерпретации геофизических данных. В отсутствие сведений о петрофизических свойствах пород или их ограниченной изученности интерпретация геофизических данных затруднена. В первую очередь это связано с возрастанием неоднозначности установления геологической природы геофизических аномалий. В свою очередь, это может приводить к неверным заключениям и ошибкам интерпретации. При этом качество интерпретации геолого-геофизических материалов во многом будет зависеть от опыта и квалификации интерпретатора. Сведения о петрофизических свойствах пород во многом упрощают геологическую интерпретацию геофизических данных и повышают ее достоверность.

Общая изученность петрофизических свойств пород Малетояямского золоторудного поля достаточно низкая: практически отсутствуют данные об удельном электрическом сопротивлении, пористости и поляризуемости пород, а также их связях с вещественным составом пород; практически не изучены петрофизические свойства пирокластических и гидротермально-метасоматически измененных пород. Эти факты послужили основанием для постановки лабораторных работ с целью петрофизической характеристики пород, распространенных в пределах Малетояямского золоторудного поля.

Лабораторно-аналитические работы проведены на коллекции из 108 образцов пород, различающихся интенсивностью гидротермально-метасоматических изменений, отобранных из керна поисково-разведочных скважин, пройденных в разные годы. Коллекция образцов включала породы из всех зон обобщенной метасоматической колонки массивов вторичных кварцитов Малетояямского золоторудного поля, типичной для месторождений алуни-кварцевого («*high sulfidation*») типа. Ее схематическое изображение приведено на рисунке 1.

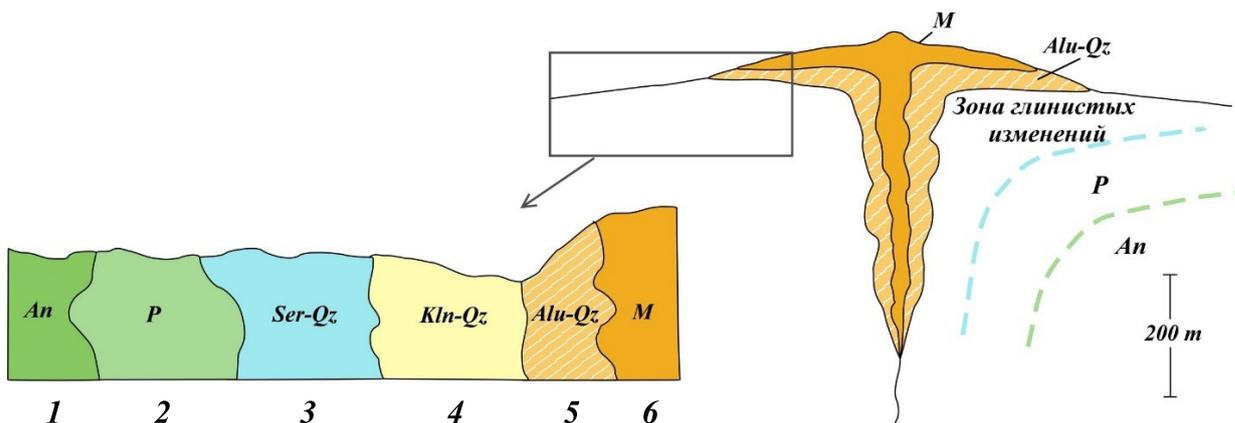


Рис. 1. Схема метасоматической зональности массивов вторичных кварцитов Малотуйваямского рудного узла.

При составлении рисунка использована схема, приведенная в работе [Arribas et al., 2000].
 Метасоматически измененные породы: М – монокварциты; Alu-Qz – алуниит-кварцевые и Kln-Qz – каолинит-кварцевые вторичные кварциты, Ser-Qz – серицит-кварцевые метасоматиты, P – пропилиты, An – андезиты.

Образцы имели форму призм полукруглого сечения (половинки зерна, диаметр 5 см) длиной 4 ± 0.2 см, шириной — 4.8 – 5 см, высотой — 2.5 – 2.8 см.

В ходе лабораторного изучения образцов определялись следующие параметры: плотность (σ), минеральная плотность ($\sigma_{\text{мин}}$), пористость (n), удельное электрическое сопротивление (ρ), поляризуемость (η) и магнитная восприимчивость (α). Аппаратура, используемое оборудование, методика проведения лабораторных работ, а также оценка погрешностей измерений приведены в [Приложении 1](#).

2. Результаты

2.1. Обобщенная петрофизическая характеристика пород

Осредненные значения петрофизических параметров для каждой зоны обобщенной метасоматической колонки массивов вторичных кварцитов Малотуйваямского рудного поля приведены на рисунке 2. Согласно данным, приведенным на рисунке 2, видно, что породы, различающиеся вещественным составом и интенсивностью метасоматического изменения, хорошо дифференцированы по петрофизическим свойствам. Последнее является основой для постановки поисково-картировочных геофизических работ.

Магнитные свойства. К магнитным породам отнесены неизменные андезиты и их пропилитизированные разности (см. рис. 2). Пропилиты и пропилитизированные породы характеризуются $\alpha_{\text{ср}}$ около $30 - 100 \times 10^{-5}$ ед. СИ, а неизменные андезиты — $\alpha_{\text{ср}}$ более 2000×10^{-5} ед. СИ. Все остальные типы пород были отнесены к немагнитным.

Плотностные свойства. Слабоизмененные и неизменные породы ветроваямской свиты (андезиты, пропилиты и кварц-серицитовые породы) обладают повышенной плотностью ($\sigma = 2.55 - 2.60$ г/см³) по сравнению с интенсивно измененными породами (монокварциты, алуниит-кварцевые и каолинит-кварцевые породы), для которых характерны значения $\sigma = 2.40 - 2.50$ г/см³ (см. рис. 2).

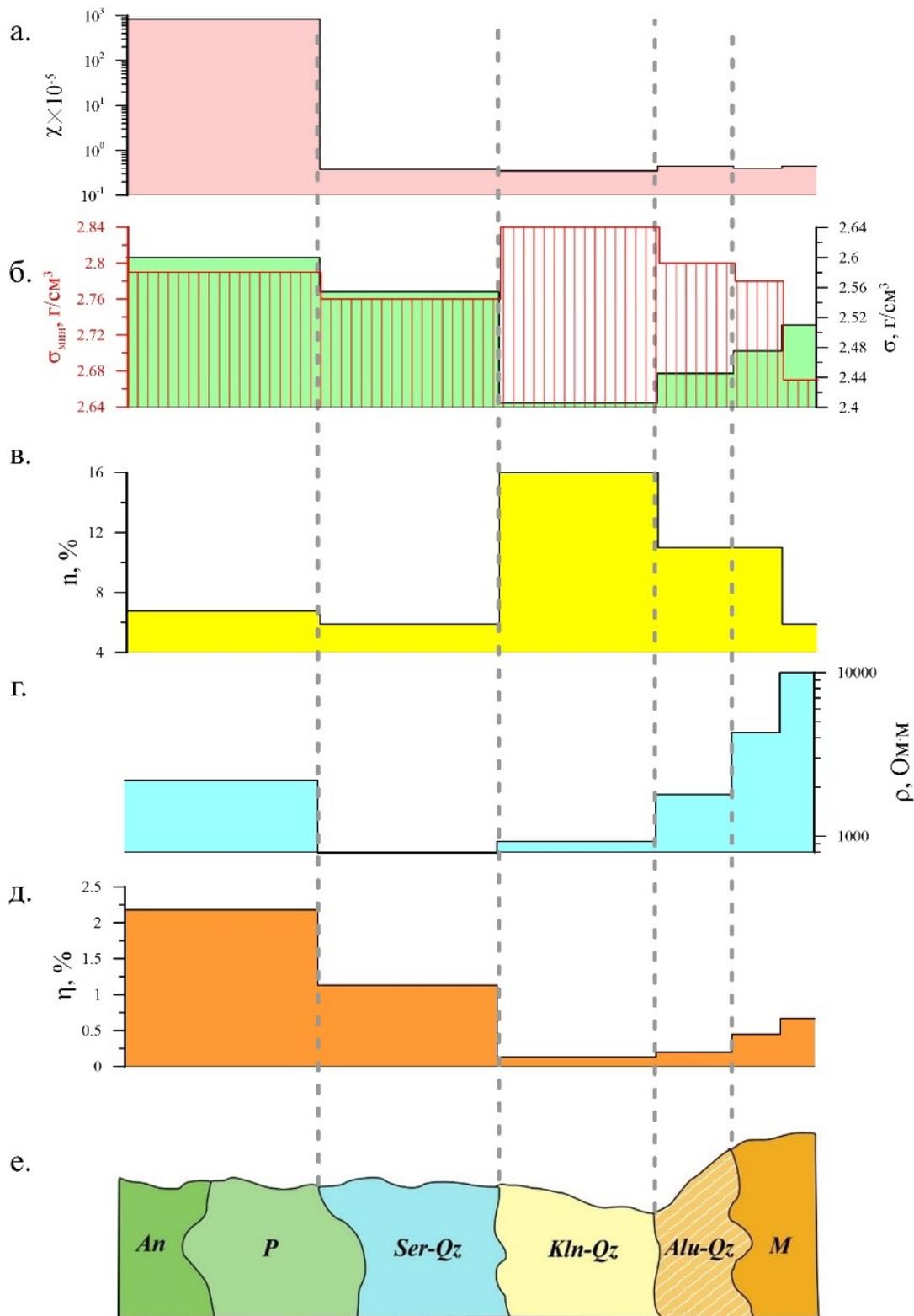


Рис. 2. Обобщенная петрофизическая характеристика зон метасоматической колонки Малетойваямского золоторудного поля.

Графики средних значений петрофизических параметров: а — магнитной восприимчивости; б — минеральной (красная линия) и общей плотности; в — пористости; г — удельного электрического сопротивления; д — поляризуемости; е — обобщенная метасоматическая колонка массивов вторичных кварцитов Малетойваямского рудного узла.

Наибольшей плотностью ($\sigma = 2.80 \text{ г/см}^3$) обладают сульфидизированные породы (пирит-кварцевые, кварц-пиритовые, каолинит-кварц-пиритовые, алунит-кварц-пиритовые и др.), содержащие более 3 – 5 % сульфидов.

Пористость пород Малетойваямского рудного поля практически не изучалась. В фондовых материалах приводятся данные о пористости сернистых вторичных кварцитов, отобранных из поисково-разведочных скважин. Все изученные образцы обладали низкой пористостью 1 – 6 %. Однако, согласно нашим данным интенсивно измененные породы обладают высокой пористостью (в среднем около 10 %) в два раза превышающей пористость вмещающих их пород (см. рис. 2).

Электрические свойства. Удельное электрическое сопротивление для серицит-кварцевых и каолинит-кварцевых пород примерно в 3 раза меньше чем у неизменных и пропицитизированных андезитов (800 – 900 Ом·м), а алунит-кварцевых — в 1.5 раза (1500 – 2000 Ом·м). Монокварциты обладают самым большим ρ около 10000 Ом·м (в 2 раза и более превышающим значения ρ , характерные для других типов пород), но их некоторые высокопористые разновидности характеризуются низким ρ (сопоставимым с ρ андезитов (около 2000 Ом·м)).

Поляризуемость (η) пород в общем случае зависит от содержания сульфидов. Для пород, не содержащих сульфиды, η не превышает 2 %. При этом η уменьшается с увеличением интенсивности изменения пород от андезитов до монокварцитов. Наименьшей поляризуемостью (породы практически не поляризуются) характеризуются каолинит-кварцевые и алунит-кварцевые породы $\eta_{\text{ср}} = 0.2 \%$, а наибольшей — сульфидизированные породы $\eta_{\text{ср}} = 6 \%$ (до 30 %).

2.2. Взаимосвязь между петрофизическими параметрами

На рисунке 3а приведен график взаимной корреляции общей (σ) и минеральной ($\sigma_{\text{мин}}$) плотности. На нем отчетливо видно, что облако точек распадается на два противоположных тренда: (1) рост $\sigma_{\text{мин}}$ сопровождается ростом σ ; (2) уменьшение $\sigma_{\text{мин}}$ сопровождается ростом σ .

На рисунке 3б и 4 приведены зависимости $\sigma(n)$ и $\sigma_{\text{мин}}(n)$. Отчетливо видно, что породы, не содержащие сульфидов, формируют компактное облако точек (с небольшим рассеянием), в то время как сульфидизированные породы характеризуются большим разбросом значений (указывает на неустойчивую связь между этими параметрами).

Таким образом, для сульфидизированных пород зависимости $\sigma_{\text{мин}}(n)$ не установлено (рис. 4). При этом согласно данным приведенным на рисунке 3 можно сделать вывод о том, что плотность сульфидизированных пород определяется преимущественно объемным содержанием сульфидов, а всех остальных — пористостью.

На рисунке 5 приведена зависимость $\rho(n)$. Анализ данных, приведенных на рисунке 5а, позволяет сделать заключение о том, что в общем случае устойчивой зависимости $\rho(n)$ нет. Последнее обусловлено следующими факторами: для сульфидизированных пород значительный вклад в суммарную электропроводность вносят сульфиды; в кавернозных породах устойчивой зависимости $\rho(n)$ чаще всего не наблюдается; выветрелые породы обычно сильнотрещиноватые, что также нарушает зависимости $\rho(n)$.

После исключения сульфидизированных пород с диаграммы взаимной корреляции ρ и n (рис. 5б) выделилось два облака точек, в пределах которых связь между $\rho(n)$ можно считать устойчивой.

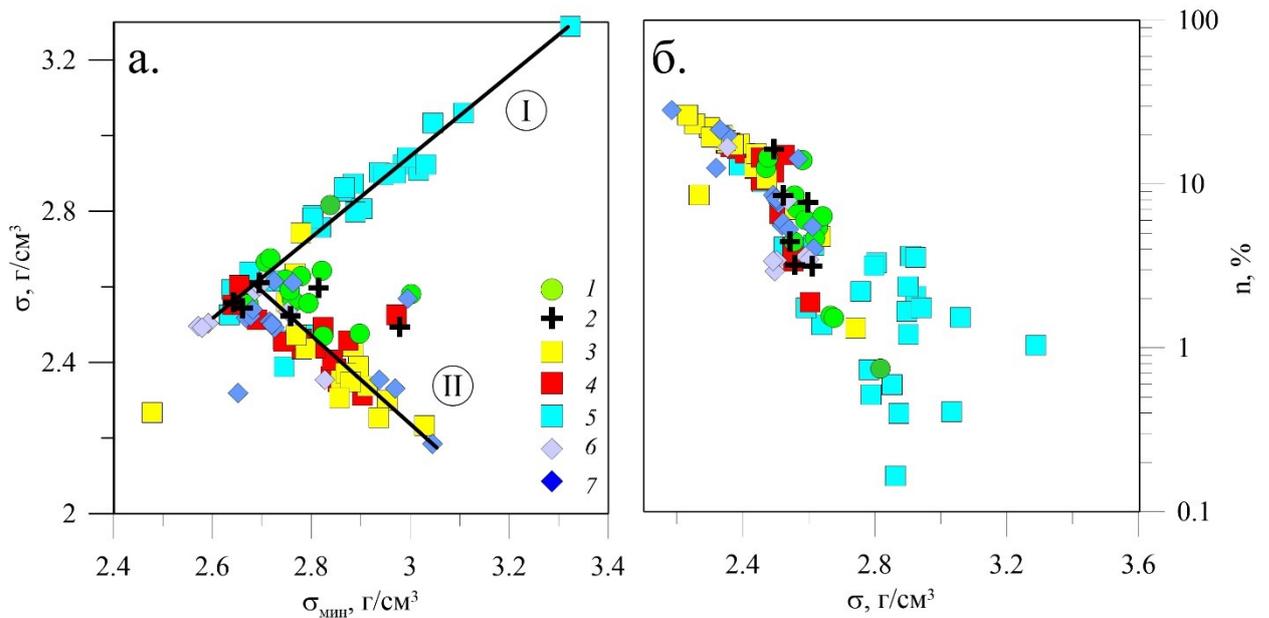


Рис. 3. Зависимость плотности от минеральной плотности (а) и пористости (б) пород.

Классы пород, различающихся вещественным составом и степенью гидротермально-метасоматических изменений: 1 – андезиты и пропилиты; 2 – гидрослюдисто-кварцевые породы; 3 – каолинит-кварцевые породы; 4 – алунит-кварцевые породы; 5 – сульфидизированные породы; 6 – монокварциты, 7 – сернистые кварциты. Черными линиями показаны два тренда: I – рост плотности пород обусловлен увеличением объемного содержания сульфидов; II – рост плотности пород обусловлен вариациями пористости.

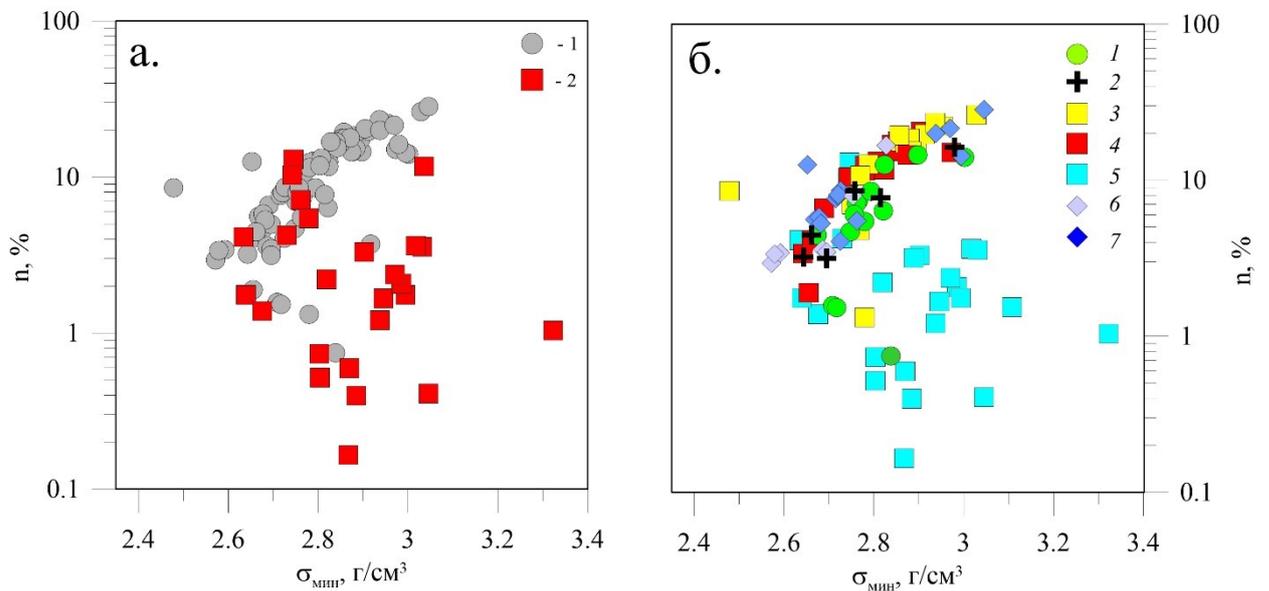


Рис. 4. Зависимость пористости от минеральной плотности пород.

а – разными символами показаны образцы, характеризующиеся (1) низкой поляризуемостью ($\eta < 3\%$) и (2) повышенной и высокой поляризуемостью ($\eta > 3\%$); б – выделенные классы пород, различающихся вещественным составом и степенью гидротермально-метасоматических изменений: 1 – андезиты и пропилиты; 2 – гидрослюдисто-кварцевые породы; 3 – каолинит-кварцевые породы; 4 – алунит-кварцевые породы; 5 – сульфидизированные породы; 6 – монокварциты, 7 – сернистые кварциты.

Первое облако точек, имеет большое рассеяние. Оно представлено преимущественно трещиноватыми, выветрелыми и кавернозными породами различного вещественного состава.

Второе облако точек, более компактное. Оно сформировано преимущественно каолинит-кварцевыми и алунит-кварцевыми породами. Для этих пород зависимость $\rho(n)$ удовлетворительно описывается законом Арчи-Дахнова [Кобранова, 1986]:

$$\rho = a\rho_v n^{-m}, (1)$$

где a — параметр, характеризующий извилистость пор; ρ_v — электропроводность поровой влаги; n — пористость; m — показатель цементации («литификации» пород). Для консолидированных пород наиболее характерные значения $m = 1.8 - 2.5$, а коэффициента извилистости $a = 1 - 1.5$.

Приняв значения $a = 1$ мы добивались наилучшего совпадения зависимости $\rho(n)$ с экспериментальными данными подбирая ρ_v и m (рис. 5).

Оптимальный угол наклона кривой, описывающей зависимость $\rho(n)$, согласно выражению (1) достигается при $m = 2.3$. Однако подстановка значения электропроводности поровой влаги, которой насыщались образцы ($\rho_v = 100$ Ом·м), приводит к смещению кривой $\rho(n)$ в краевую часть облака точек (рис. 5). Было установлено, что удовлетворительное совпадение между экспериментальными данными и теоретической зависимостью $\rho(n)$ наблюдается при $\rho_v = 30$ Ом·м. Последнее указывает на то, что минерализация поровых вод в пределах Малетойваямского рудного поля оказалась больше, чем минерализация раствора, которым насыщались образцы. Согласно выполненным расчетам минерализация поровых вод в пределах Малетойваямского рудного поля составляет около 0.3 – 0.5 г/л.

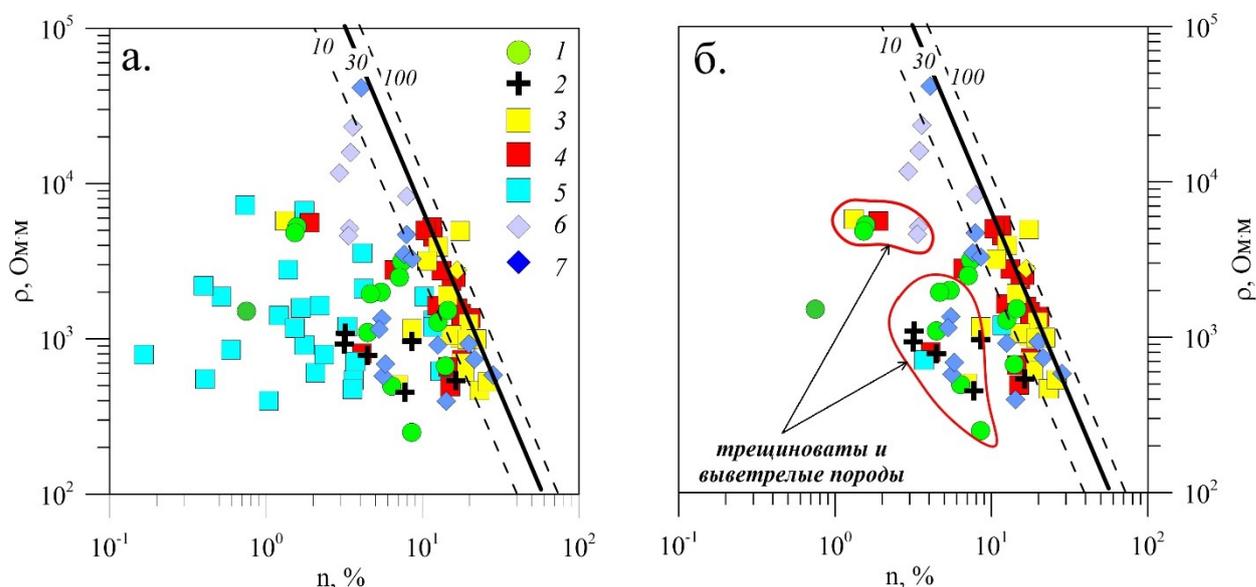


Рис. 5. Зависимость УЭС от пористости пород.

Классы пород, различающихся вещественным составом и степенью гидротермально-метасоматических изменений: 1 – андезиты и пропилиты; 2 – гидрослюдисто-кварцевые породы; 3 – каолинит-кварцевые породы; 4 – алунит-кварцевые породы; 5 – сульфидизированные породы; 6 – монокварциты, 7 – сернистые кварциты. Черными линиями показаны зависимости $\rho(n)$, предсказываемые законом Арчи-Дахнова ($a = 1$, $m = 2.3$); числа около линий отвечают электропроводности поровой влаги, использованной для расчета зависимостей $\rho(n)$.

Для изученных образцов установлено две основных зависимости: (1) рост η с увеличением ρ (рис. 6а); (2) уменьшение η с увеличением n (рис. 6б).

Согласно теоретическим данным поляризуемость пород, не содержащих сульфидов, в значительной мере определяется удельной поверхностью пор ($\eta \sim S_{\text{пор}}$) [Weller et al. 2010]: чем больше $S_{\text{пор}}$, тем сильнее поляризуется порода (рост n , в частности, должен приводить к росту $S_{\text{пор}}$). Однако, эта зависимость нарушается в породах, в которых поры имеют большие размеры (например, в пемзе, кавернозных известняках и др.). По нашим данным установлена противоположная зависимость: уменьшение η с ростом n . Мы предполагаем, что установленная зависимость $\eta(n)$ обусловлена тем, что в изученных образцах преобладают большие поры (диаметром 100 мкм и более) и пустоты выщелачивания (подтверждается визуальным наблюдениями). В этом случае в породах с одинаковой пористостью, но разным количеством полостей выщелачивания $S_{\text{пор}}$ (следовательно, и η) сильно зависит от объемной доли последних.

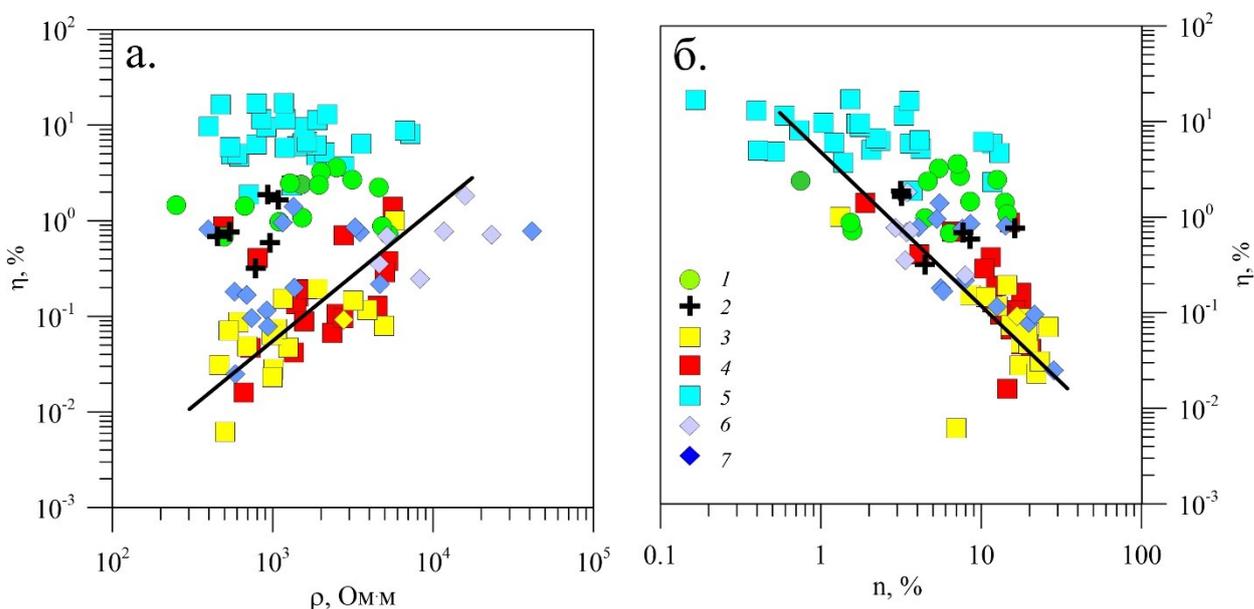


Рис. 7. Зависимость поляризуемости от УЭС (а) и пористости (б) пород.

Классы пород, различающихся вещественным составом и степенью гидротермально-метасоматических изменений: 1 – андезиты и пропилиты; 2 – гидрослюдисто-кварцевые породы; 3 – каолинит-кварцевые породы; 4 – алунит-кварцевые породы; 5 – сульфидизированные породы; 6 – монокварциты, 7 – сернистые кварциты.

3. Выводы

Породы Малетойваямского золоторудного поля достаточно хорошо дифференцированы по петрофизическим свойствам, что является основой для постановки поисково-картировочных геофизических работ.

По магнитным свойствам слабо- и неизменные породы уверенно отличаются от интенсивно измененных пород. Следовательно, магниторазведку можно применять для картирования пород, различающихся степенью гидротермально-метасоматического изменения. Однако выделять разности, различающиеся вещественным составом среди интенсивно измененных пород по данным магниторазведки невозможно, так как все они практически немагнитны. Таким образом, магниторазведку необходимо комплексировать с другими геофизическими методами, например, с электроразведкой.

По плотности и УЭС породы дифференцированы лучше. В первую очередь это связано с тем, что оба параметра зависят от пористости пород, которая сильно изменяется при переходе от неизменных андезитов к алунит-кварцевым или каолинит-кварцевым породам. В отличие от магнитных свойств интенсивно измененные породы различаются по плотности и УЭС (в частности, монокварциты хорошо отделяются от каолинит-кварцевых, серицит-кварцевых пород и андезитов, а каолинит-кварцевые, серицит-кварцевые породы от андезитов и монокварцитов). Хорошая дифференциация пород по плотности и УЭС позволяет полагать, что по результатам грави- или электроразведочных работ методами кажущегося сопротивления породы можно дифференцировать по вещественному составу.

По результатам петрофизических работ установлено, что поляризуемость пород связана прямо пропорциональной зависимостью с объемным содержанием сульфидов. Таким образом, электроразведочные работы методом ВП целесообразно проводить для поиска и оконтуривания сульфидизированных пород, так как для решения структурно-картировочных задач выгоднее использовать более дешевый метод кажущегося сопротивления.

Установленные связи петрофизических параметров с вещественным составом пород, а также сделанные на их основе предположения о эффективности применения геофизических методов при решении поисковых и картировочных задач, подтверждаются результатами выполненных ранее полевых геофизических работ.

Список литературы

- Кобранова В.Н. Петрофизика. М.: «Недра», 1986, 384 с.
- Weller A., Slater L., Nordsiek S., Ntarlagiannis D. On the estimation of specific surface per unit pore volume from induced polarization: A robust empirical relation fits multiple data sets // *Geophysics*, 75 (4), 2010, P. WA105–WA112. DOI: 10.1190/1.3471577.

Аппаратура, используемое оборудование, методика проведения лабораторных работ, погрешности измерений

В ходе лабораторного изучения петрофизических свойств образцов определялись следующие параметры: плотность (σ), минеральная плотность ($\sigma_{\text{мин}}$), пористость (n), удельное электрическое сопротивление (ρ), поляризуемость (η) и магнитная восприимчивость (χ).

Определение плотности и пористости образцов проведено методом гидростатического взвешивания по стандартной методике [Кобранова, 1986].

Сначала образцы высушивались в сушильном шкафу до постоянного веса при температуре 105 °С для удаления оставшейся поровой влаги (в течении 24 часов). После чего проводилось их взвешивание (определялся вес образца в газонасыщенном состоянии (m_r)). Затем образцы под вакуумом в течении 24 часов насыщались дистиллированной водой, содержащей 70 мг $NaCl$ (электропроводностью 100 мкСм/см). После полного водонасыщения образцов измерялся их вес в воздухе (вес полностью водонасыщенных образцов (m_B)) и в воде (m_{BB}).

Для измерения массы образцов использованы весы 4-го класса точности ВЛКТ-500. Точность измерения массы ± 10 мг.

Расчет плотности (σ), минеральной плотности ($\sigma_{\text{мин}}$) и пористости (n) проведен используя следующее соотношения:

$$\sigma = \frac{m_B}{m_B - m_{BB}}, \quad (1)$$

$$n = \frac{m_r - m_B}{m_B - m_{BB}}, \quad (2)$$

$$\sigma_{\text{мин}} = \frac{m_B}{(1-n)}. \quad (3)$$

Среднеквадратическая погрешность определения плотности образцов, по результатам контрольных измерений (7 % от общего количества образцов) составила 0.0042 г/см³, а пористости — 0.15 %.

Удельное электрическое сопротивление (УЭС) и поляризуемость образцов определялись с помощью четырехэлектродной установки (рис. 8) на полностью водонасыщенных (под вакуумом) образцах. Измерения проведены серийным измерителем АИЭ-2 и лабораторным генератором малых токов (стабилизация тока ± 0.1 мкА) во временной области. Для согласования с нагрузкой на вход измерителя подключался эмиттерный повторитель (для увеличения входного сопротивления измерителя). Использовался режим разнополярных импульсов тока с паузами.

Длительность импульсов тока (T) равнялась 1 с. Измерения кривых спада поляризуемости на ранних (0.03 мс – 12.5 мс) и поздних (100 мс – 1 с) временах проводились с разной шириной временного окна, что позволяет повысить отношение сигнал/шум. В качестве приемных электродов использовались хлор-серебряные неполяризующиеся электроды.

Расчет поляризуемости и УЭС образцов проведен по следующим формулам:

$$\eta = \sum_{i=1}^N \eta_i \Delta \ln(t_i) / \sum_{i=1}^N \Delta \ln(t_i), \quad (4)$$

$$\rho = K \frac{U_{\text{пр}}}{I}, \quad (5)$$

где $\eta_i = U_{\text{ВП}i} / U_{\text{пр}}$ — поляризуемость в i -ом временном окне; $U_{\text{пр}}$ — напряжение, измеренное в конце импульса тока; $U_{\text{ВП}i}$, t_i — напряжение, измеренное в паузе между импульсами тока и время после выключения тока для i -ого временного окна, N — количество временных окон, K — геометрический коэффициент лабораторной установки.

Относительная погрешность определения ρ , по результатам контрольных измерений (5 % от общего количества образцов) составила 1.2 %, поляризуемости — 0.5 %.

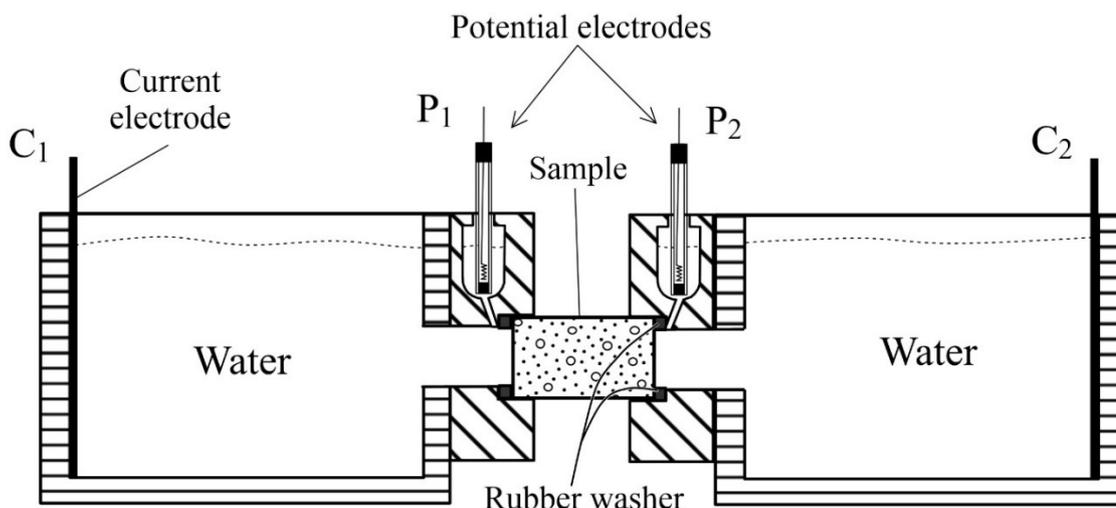


Рис. 8. Схема лабораторной установки для измерения ВП и УЭС образцов.

Измерения магнитной восприимчивости проведено портативным капнометром КТ-10 (Inc «Terrapulse» (<http://www.terraplus.ca>)), так как образцы имели нестандартную форму и не помещались в шахту лабораторного капнометра. По этой причине измеренные значения магнитной восприимчивости следует считать кажущимися, так как влияние формы образцов учитывалось приближенно (использован коэффициент размагничивания (G) для сжатого сфероида, намагниченного поперек оси вращения, с отношением полуосей $1/2$ ($G \approx 3$)):

$$\varkappa = \frac{\varkappa_k}{1 - G\varkappa_k}, \quad (6)$$

где \varkappa_k — измеренное значение \varkappa .

По результатам контрольных измерений (5 % от общего количества образцов) среднеарифметическая ошибка определения \varkappa_k составила $\pm 5 \times 10^{-6}$.