



Научная статья

УДК 552.5:553.11

EDN: TJRMIG

DOI: 10.21285/2686-9993-2026-49-2-1

Петрофизические свойства горных пород железорудного месторождения Баргилт, Монголия

Т. Бямбасурэн^{a,✉}, Т. Цогт^b, У. Хулан^c, С. Уржинханд^d

^{a,b,d}Монгольский университет науки и технологий, Улан-Батор, Монголия

^cГорно-обогатительный комбинат «Бор-Ундур», провинция Хэнтий, Монголия

Аннотация. Месторождения железной руды играют важную роль в экономике Монголии, основанной на добыче полезных ископаемых, и требуют детального геологического и геофизического изучения для эффективной разведки и оценки ресурсов. Данное исследование посвящено месторождению железной руды Баргилт, расположенному в провинции Хэнтий в Монголии на лицензионном участке MV-016657, эксплуатируемом государственным предприятием «Монголросцветмет». Основная цель исследования заключалась в том, чтобы охарактеризовать минералогический состав, свойства горных пород и глубинное распределение рудоносных зон, чтобы лучше понять структуру и потенциал месторождения. Для определения минерального состава и текстурных взаимосвязей были использованы методы полевого геологического картирования, петрографического анализа и петрофизической интерпретации. Были собраны и измерены петрофизические параметры, проанализированы репрезентативные образцы рудоносных (59 образцов) и вмещающих (440 образцов) пород. Магнетит был идентифицирован как доминирующий рудный минерал, сопровождаемый второстепенными акцессорными минералами, в то время как вмещающие породы в основном состоят из силикатных жильных минералов. Петрофизические данные были интерпретированы для определения подземных аномалий, связанных с зонами обогащения железом, и для выявления структурных факторов, влияющих на минерализацию. Результаты исследования показывают, что минерализация железной руды контролируется структурой и имеет переменное пространственное распределение, на которое влияют литологические границы и системы разломов. Интеграция геологических и петрофизических наборов данных обеспечивает более надежную модель геометрии рудного тела и его непрерывности. Результаты проведенного исследования демонстрируют эффективность комбинированных методов для повышения точности разведки и могут являться основой для дальнейшей детальной оценки железорудного месторождения Баргилт с целью планирования будущей разработки.

Ключевые слова: плотность, магнитная восприимчивость, поляризуемость, удельное сопротивление, геостатистика.

Финансирование. Исследование проводилось при поддержке и сотрудничестве горно-обогатительного комбината «Бор-Ундур» (провинция Хэнтий, Монголия) и финансовой поддержке геологического факультета Монгольского университета науки и технологий (г. Улан-Батор, Монголия).

Благодарности. Авторы выражают искреннюю благодарность геологическому департаменту горно-обогатительного комбината «Бор-Ундур» за ценную поддержку и предоставление высококачественных полевых данных, справочной информации и наборов геологических данных, необходимых для проведенного исследования. Авторы также выражают особую благодарность студентам-геофизикам Монгольского университета науки и технологий 2022–2023 учебного года за их помощь и вклад в исследование.

Для цитирования: Бямбасурэн Т., Цогт Т., Хулан У., Уржинханд С. Петрофизические свойства горных пород железорудного месторождения Баргилт, Монголия // Науки о Земле и недропользование. 2026. Т. 49. № 2. С. ?–?. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2026-49-2-1>. EDN: TJRMIG.

Original article

Petrophysical properties of rocks from the Bargilt iron ore deposit, Mongolia

Turtogtokh Byambasuren^{a,✉}, Tumor Tsogt^b,
Ulziijargal Khulan^c, Sodnomdarjaa Urjinkhand^d

^{a,b,d}Mongolian University of Science and Technology, Ulaanbaatar, Mongolia

^cBor-Undur Mineral Processing Plant, Khentii Province, Mongolia

Abstract. Iron ore deposits play a significant role in Mongolia's mineral-based economy and require detailed geological and geophysical investigation for effective exploration and resource evaluation. This study focuses on the

© Бямбасурэн Т., Цогт Т., Хулан У., Уржинханд С., 2026



Bargilt iron ore deposit located in Khentii Province, Mongolia, within the MV-016657 license area operated by the state-owned enterprise Mongolrostsvetmet. The main objective of the study is to characterize the mineralogical composition, rock properties, and subsurface distribution of ore-bearing zones for better understanding of the deposit's structure and potential. A combination of field geological mapping, petrographic analysis, and petrophysical interpretation was used to determine the mineral composition and textural relationships. Representative samples of ore-bearing (59 samples) and host rocks (440 samples) have been collected, measured and analyzed. Magnetite was identified as the dominant ore mineral accompanied by minor accessory minerals, while the host rocks are mainly composed of silicate gangue minerals. Petrophysical data were interpreted to identify subsurface anomalies associated with iron-enriched zones and to identify structural factors influencing mineralization. The study results indicate that the iron ore mineralization is structure-controlled and exhibits a variable spatial distribution influenced by lithological boundaries and fault systems. Integration of geological and petrophysical datasets provides a more reliable model of ore body geometry and its continuity. The study results demonstrate the effectiveness of combined methods for improving exploration accuracy and can serve as a basis for further detailed assessment of the Bargilt iron ore deposit for future development planning.

Keywords: density, magnetic susceptibility, chargeability, resistivity, geostatistics

Funding. The research was carried out with the support and cooperation of the Bor-Undur Mineral Processing Plant (Khentii Province, Mongolia) and financial support from the Department of Geology of the Mongolian University of Science and Technology (Ulaanbaatar, Mongolia).

Acknowledgements. The authors would like to express their sincere gratitude to the Geological Department of the Bor-Undur Mineral Processing Plant for their valuable support and provision of high-quality field data, reference information, and geological datasets necessary for this study. The authors also give special thanks to the geophysical students of the 2022–2023 academic year at the Mongolian University of Science and Technology for their assistance and contribution to this research.

For citation: Byambasuren T., Tsogt T., Khulan U., Urjinkhand S. Petrophysical properties of rocks from the Bargilt iron ore deposit, Mongolia. *Earth sciences and subsoil use*. 2026;49(2):?–?. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2026-49-2-1>. EDN: TJRMIG.

Введение

Месторождения железа действительно являются важнейшим компонентом минеральных ресурсов Монголии и ключевым фактором ее экономического развития, часто занимая третье или четвертое место по объему экспорта после угля и меди. Данное исследование посвящено открытому железнорудному «Баргилт», эксплуатируемому государственным предприятием «Монголросцветмет», расположенному в провинции Хэнтий, Монголия. Месторождение является частью лицензионного участка на добычу полезных ископаемых MV-016657 и занимает площадь около 133,08 га. Участок представляет собой важное месторождение железа в региональной металлогенической структуре Восточной Монголии (рис. 1). Территория месторождения содержит два железорудных тела промышленного значения, ориентированных в широтном (центральное рудное тело) и продольном (рудное тело № 1) направлении. Во время геологоразведочной экспедиции 1987 г. эти рудные тела были исследованы с помощью 10 открытых траншей и 10 скважин. В ходе последующей детальной разведки, проведенной в 2009 г., дополнительные исследования включали 7 небольших открытых траншей (общим объемом 364,8 м³) и 7 скважин (общая длина бурения составила

825,5 м). Параллельно с этими работами проводились геофизические исследования. Считается, что в результате геологоразведочной экспедиции 1987 г. были получены относительно полные и обоснованные данные, позволяющие проводить более надежную геологическую интерпретацию по сравнению с предыдущими исследованиями. В 2020 и 2021 гг. была пробурена в общей сложности 31 скважина (5906,5 м) в рамках глубокого бурения, направленного на увеличение количества запасов и повышение их категории. Геофизические исследования основаны на фиксировании изменений физических свойств горных пород и минералов, включая плотность, магнитную восприимчивость, электрическое сопротивление и поляризуемость. Эти различия в физических свойствах пород порождают различные аномалии, которые могут быть использованы для определения геологических структур недр, литологических границ и зон рудной минерализации [1–4]. Кроме того, петрофизические характеристики обеспечивают фундаментальную основу для интерпретации геофизических данных и улучшают понимание литологической изменчивости, геологических структур и процессов рудообразования. Интеграция петрофизических измерений с геофизическими наблюдениями повышает надежность разведки полезных



ископаемых и оценки ресурсов^{1,2} [5–7]. Богатые магнетитом скарновые месторождения демонстрируют отчетливые петрофизические различия по сравнению с окружающими их коренными породами, включая повышенную плотность, магнитную восприимчивость и в некоторых случаях поляризуемость. Эти различия приводят к измеримым геофизическим аномалиям, что делает магнитные, гравитационные методы и методы вызванной поляризации эффективными инструментами для разведки и определения границ скарновых железорудных месторождений [8–11]. В районе месторождения эти исследования позволили уточнить ранее полученные результаты: предоставить дополнительную информацию о морфологии, геологическом строении, категории, качестве и пространственном распределении рудных тел, а

также улучшить общую геологическую модель месторождения.

В 2023 г. петрофизические свойства образцов керна были определены с использованием четырех параметров: плотности, удельного сопротивления, поляризуемости и магнитной восприимчивости.

Основной целью исследования физических свойств горных пород является определение фундаментальных физических параметров железорудных и нерудных вмещающих пород, а также изучение их пространственного распределения, взаимосвязей и лежащих в их основе корреляций с геологическими структурами и образованиями.

В будущем это позволит создать фундаментальную базу данных для определения отличительных физических свойств рудных

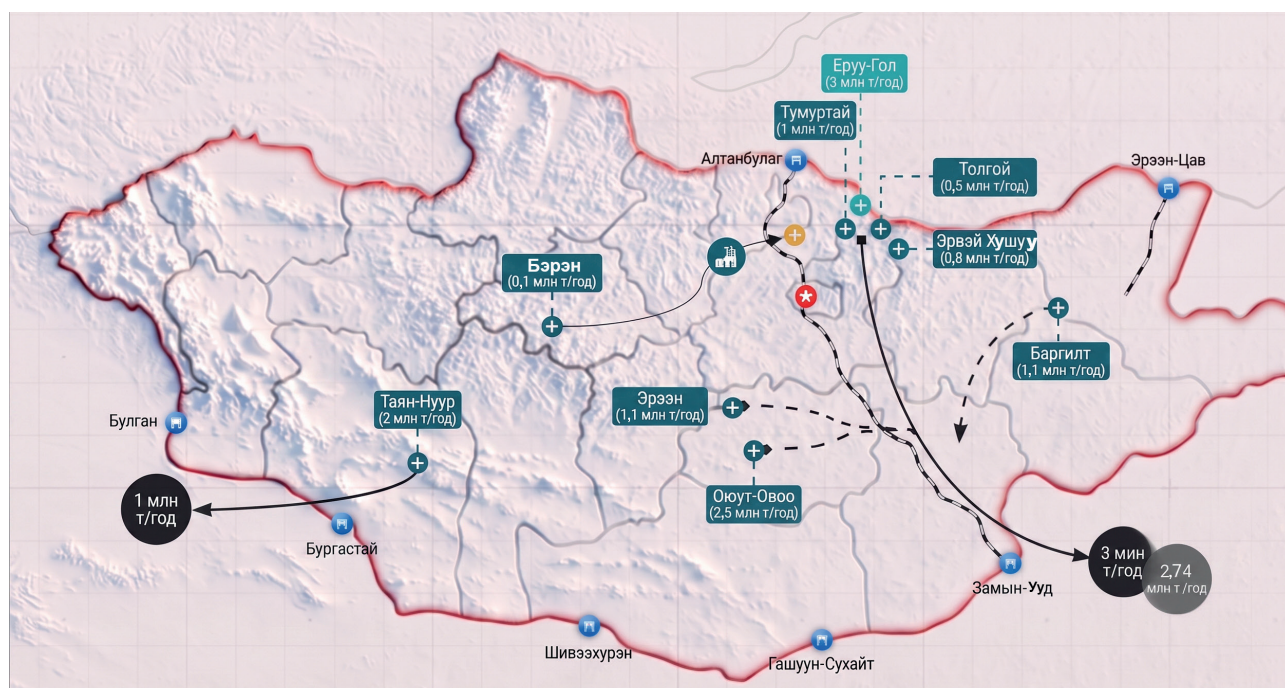


Рис. 1. Карта расположения месторождения Баргилт (по данным Института экономических исследований, 2014 г.):

1 – железная дорога; 2 – пограничный переход; 3 – железорудный рудник;
4 – рудник железного концентрата; 5 – экспортное направление; 6 – внутреннее направление;
7 – обогатительная фабрика; 8 – металлургический завод

Fig. 1. Location map of the Bargilt iron ore deposit (according to the Economic Research Institute data, 2014):

1 – railway; 2 – border crossing; 3 – iron ore mine;
4 – iron concentrate mine; 5 – export direction; 6 – domestic direction;
7 – mineral processing plant; 8 – metallurgical plant

¹ Carmichael R.S. Practical handbook of physical properties of rocks and minerals. New York: CRC Press, 2017. 756 p.

² Добрынин В.М., Вендельштейн Б.Ю., Кожевников Д.А. Петрофизика: учебник для студентов вузов. М.: Недра, 1991. 367 с.



и нерудных пород, улучшения детальной характеристики структуры и морфологии месторождения, а также для улучшения обработки и интерпретации геофизических данных, полученных из нескольких скважин на исследуемой территории.

Материалы и методы исследования

Физические свойства образцов горных пород из исследуемой территории были системно описаны с помощью лабораторных измерений и детальных процедур. Магнитная восприимчивость отражает способность горных пород намагничиваться в присутствии внешнего магнитного поля и в значительной степени определяется содержанием ферромагнитных минералов. Это свойство широко используется в геофизических исследованиях для различения типов горных пород и выявления зон минерализации [12–16]. Все анализы проводились с использованием откалиброванных приборов и оборудования лаборатории геофизики геологического факультета Монгольского университета науки и технологии (г. Улан-Батор, Монголия). Перед измерениями образцы были подготовлены в соответствии со стандартными лабораторными протоколами для обеспечения согласованности и надежности результатов. Экспериментальные работы проводились в хранилище образцов рудника «Бор-Ундур» в период с 5 по 20 июня 2023 г.

Подготовка образцов. Образцы керна, использованные в данном исследовании, были получены в результате бурения, проведенного в 2020 и 2021 гг. Образцы, отобранные для лабораторных измерений, соответствовали требуемым критериям, касающимся размеров и состояния поверхности, для обеспечения точности и воспроизводимости измерений. Перед анализом каждый образец был классифицирован и маркирован в соответствии с его литологическими характеристиками.

Измерение магнитной восприимчивости. Магнитная восприимчивость образцов горных пород была определена с помощью датчика на основе метода переходных процессов (MPP-EM2S+, серийный номер MP1131, GDD Instruments, Канада). Все измерения проводились в стандартных лабораторных условиях. Для каждого образца измерения проводились на трех ортогональных поверхностях, чтобы свести к минимуму смещение направления и повысить надежность результатов.

Измерения удельного электрического сопротивления и поляризуемости. Характеристики удельного электрического сопротивления и поляризуемости образцов горных пород были определены с помощью измерителя вызванной поляризации образцов керна (SCIP) модели TDLV (серийный номер SC2053, GDD Instruments, Канада). Измерения проводились в контролируемых лабораторных условиях с использованием стандартной четырехэлектродной конфигурации. В образец подавался постоянный электрический ток, и измерялась результирующая разность потенциалов на внутренних электродах.

Измерение плотности. Объемная плотность образцов породы была определена с помощью электронного денситометра MZ-Z600 (Китай). Измерения проводились с использованием прямого метода определения массы и объема. Массу каждого образца измеряли с помощью прецизионных электронных весов, а объем – непосредственно с помощью денситометра в контролируемых лабораторных условиях.

Методика обработки данных. Чтобы оценить взаимосвязи между физическими свойствами образцов железной руды с месторождения Баргилт и классифицировать образцы на основе их физико-химических характеристик, была применена комбинация корреляционного и кластерного анализа. Корреляционный анализ использовался для количественной оценки силы и направления взаимосвязей между измеряемыми физическими свойствами, в то время как кластерный анализ применялся для группировки образцов со сходными характеристиками [17–19]. Этот комплексный статистический подход позволил выявить основные связи между переменными и способствовал объективной классификации выборок в соответствии с их сходством по физическим свойствам. Методологические подходы, использованные в этом исследовании, обобщены в табл. 1, где представлен обзор статистических методов, используемых для обработки и интерпретации данных.

Классификация образцов месторождения. Образцы горных пород, собранные на исследуемой территории, были классифицированы на основе их минералогического состава, пространственного распределения рудных минералов и содержания железа. На основании этих критериев образцы были разделены на



Таблица 1. Сравнение методов корреляционного и кластерного анализа
Table 1. Comparison of correlation and cluster analysis method

Свойство	Корреляционный анализ	Кластерный анализ
Цель	Определить статистические взаимосвязи между переменными	Классифицировать образцы по гомогенным группам на основе сходства
Результат	Коэффициент корреляции r , указывающий на силу и направление взаимосвязей	Принадлежность к кластеру и центроиды кластера, представляющие характеристики группы
Тип данных	Двумерный анализ (попарная взаимосвязь между двумя переменными)	Многомерный анализ (одновременное рассмотрение нескольких переменных)
Методологический подход	Классический статистический метод	Многомерный статистический анализ/ метод неконтролируемого машинного обучения

две основные группы: образцы, содержащие железную руду, и образцы нерудных (вмещающих) горных пород. Эта классификация была использована в качестве основы для последующего физико-химического анализа и статистической оценки. Классификация образцов горных пород с исследуемой территории по минералогическому составу, показывающая рудные и нерудные минеральные ассоциации в железистых и вмещающих породах, представлена в табл. 2.

На этапе статистической обработки все данные выборок были систематизированы и внесены в структурированную базу данных для обеспечения согласованности и прослеживаемости данных. Затем скомпилированный набор данных был предварительно обработан и подготовлен для дальнейшего статистического анализа.

Результаты исследования и их обсуждение

Образцы, содержащие железную руду. Корреляционный анализ показывает, что сильные положительные корреляции ($r = 0,48-0,611$) между плотностью, поляризуемостью и магнитной восприимчивостью согласуются с нали-

чием железорудной минерализации, особенно в зонах, богатых магнетитом. Повышенные значения магнитной восприимчивости и плотности свидетельствуют о значительных концентрациях ферромагнитных минералов, в то время как повышенная поляризуемость может указывать на присутствие сопутствующих сульфидных минералов. Слабая отрицательная корреляция с удельным сопротивлением еще раз подтверждает тот факт, что минерализованные зоны обладают относительной электропроводностью по сравнению с окружающими вмещающими породами (рис. 2).

Результаты кластеризации по методу K-средних, примененные к данным об удельном сопротивлении и поляризуемости 58 образцов железной руды. Синие точки представляют отдельные измерения, а красный маркер указывает на центроид (среднее значение) набора данных. Распределение показывает слабую отрицательную корреляцию ($r = -0,699$), где более низкие значения удельного сопротивления, как правило, связаны с более высокой поляризуемостью, что отражает влияние минерализации. Эта тенденция свидетельствует о том, что комбинированные параметры удельного сопротивления и вы-

Таблица 2. Классификация образцов горных пород
Table 2. Rock sample classification

Категория	Образцы, содержащие железную руду		Нерудные (вмещающие) образцы горных пород
	Рудные минералы	Нерудные минералы	
Первичные	Магнетит, висмутинит, самородный висмут	Пироксен, форстерит, плагиоклаз, флогопит, хондродит, брусит, тремолит, хлорит, графит	Известняк, диоритовый гнейс, гранитный гнейс, сильно измененные скарном породы, мелкозернистый жильный гранит
Вторичные и редкие	Гематит, халькопирит, висмутит, малахит, арсенопирит, пирит, марказит, пирротин, ильменит	Кальцит, эпидот, хлорит, мусковит, гроссуляр, серицит, лейкоксен, серпентин, тремолит	

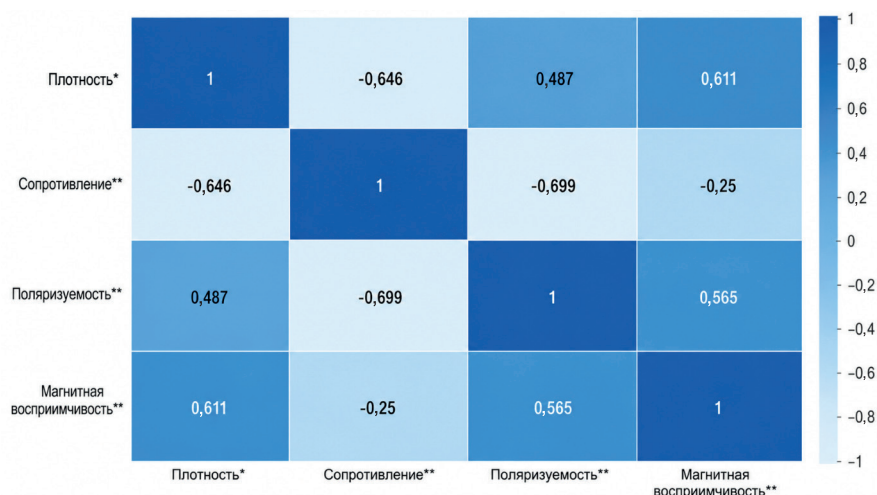


Рис. 2. Коэффициент корреляции между физическими свойствами образцов железорудных материалов

Закон распределения: * – нормальное; ** – логнормальное

Fig. 2. Correlation coefficient between the physical properties of iron ore samples

Distribution law: * – normal; ** – lognormal

званной поляризации позволяют эффективно отличать минерализованные зоны от неминерализованных вмещающих пород (рис. 3).

Образцы нерудных (вмещающих) горных пород. Тепловая карта корреляции показывает, как правило, слабую взаимосвязь между плотностью, удельным сопротивлением, поляризуемостью и магнитной восприимчивостью, при этом все коэффициенты корреляции r находятся в диапазоне от -0,117 до 0,248 (рис. 4). Самая сильная положительная корреляция наблюдается между плотностью и магнитной восприимчивостью ($r = 0,248$), в то время как удельное сопротивление и поляризуемость демонстрируют слабую отрицательную корреляцию ($r = -0,117$).

званной поляризации позволяют эффективно отличать минерализованные зоны от неминерализованных вмещающих пород (рис. 3).

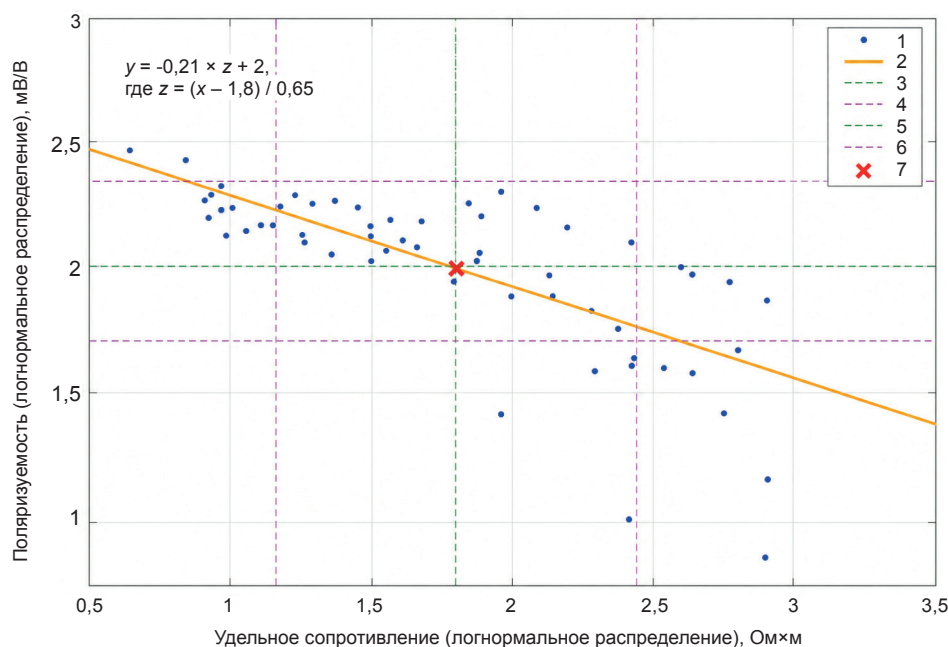


Рис. 3. Результаты кластерного анализа удельного сопротивления и поляризуемости для образцов железосодержащих руд:

1 – рудоносные образцы; 2 – линейная зависимость; 3 – среднее значение X ; 4 – стандартное отклонение X ; 5 – среднее значение Y ; 6 – стандартное отклонение Y ; 7 – центр оид кластера

Fig. 3. Cluster analysis results of resistivity and chargeability for iron ore samples:

1 – ore-bearing samples; 2 – linear dependence; 3 – X mean value; 4 – X standard deviation; 5 – Y mean value; 6 – Y standard deviation; 7 – cluster centroid

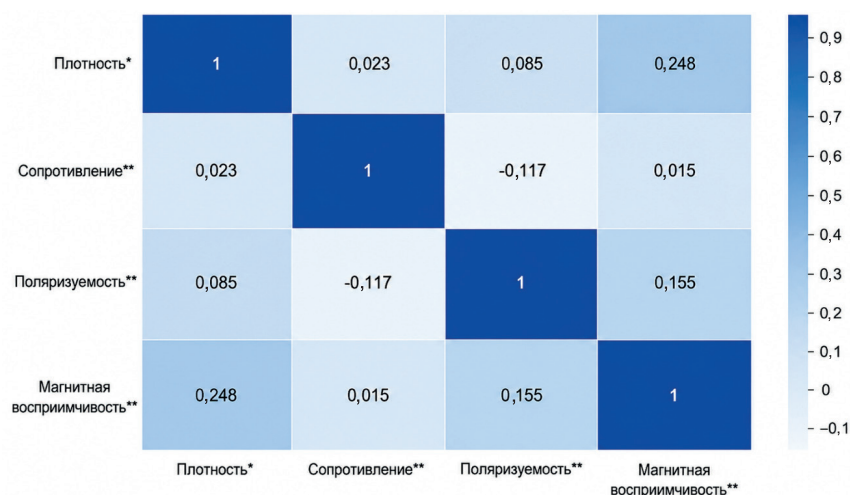


Рис. 4. Коэффициент корреляции между физическими свойствами образцов нерудных (вмещающих) пород

Закон распределения: * – нормальное; ** – логнормальное

Fig. 4. Correlation coefficient between the physical properties of non-metallic (host) rock samples

Distribution law: * – normal; ** – lognormal

В целом отсутствие сильных корреляционных связей означает, что каждый физический параметр вносит в набор данных относительно независимую информацию. Такая независимость полезна для многомерного статистического анализа (например, кластеризации или классификации), поскольку она уменьшает избыточность и повышает способность различать литологические вариации или вариации, связанные с минерализацией.

При кластерном анализе зависимость между удельным электрическим сопротивлением и поляризуемостью образцов нерудных (вмещающих) пород демонстрирует широкое и рассеянное распределение, что указывает на значительную литологическую неоднородность в наборе данных. Значения удельного сопротивления колеблются в широком диапазоне, в то время как поляризуемость остается относительно ограниченной в пределах от низкого до умеренного уровня, что позволяет предположить, что поляризационный отклик не сильно зависит только от удельного сопротивления (рис. 5). Отсутствие четкой линейной корреляции между этими двумя параметрами подразумевает, что процессы электропроводности и вызванной поляризации определяются различными петрофизическими факторами. В частности, удельное сопротивление в первую очередь зависит от структуры пор, содержания жидкости и связности минералов, в то время как поляризуемость в большей степени зависит от присутствия и распределения рассеянных проводящих минералов, таких как сульфиды и графит.

Центроид набора данных отражает среднее геоэлектрическое поведение вмещающих пород и указывает на преобладающую неминерализованную фоновую характеристику. Группировка большинства данных с относительно низкими значениями поляризуемости дополнительно подтверждает предположение о том, что сульфидная минерализация либо отсутствует, либо присутствует в очень незначительных концентрациях во вмещающих породах. Кроме того, геофизические данные свидетельствуют о том, что вмещающие породы характеризуются резистивными, но слабо поляризуемыми свойствами, что соответствует литологии с преобладанием силикатов и ограниченным содержанием проводящих минералов. На основании поведения центроида кластера можно сказать, что каждый кластер представляет собой различные петрофизические свойства с четкими литологическими и минералогическими последствиями.

Кластер 1 (образцы, содержащие железную руду). Этот кластер характеризуется высокой магнитной восприимчивостью, высокой поляризуемостью, относительно высокой плотностью и низким удельным сопротивлением. С точки зрения петрофизики, он представляет собой сильно минерализованную зону, в которой преобладают богатые магнетитом железные руды. Очень высокий магнитный отклик указывает на значительную концентрацию ферромагнитных минералов, в то время как низкое удельное сопротивление свидетельствует о повышенной электропро-

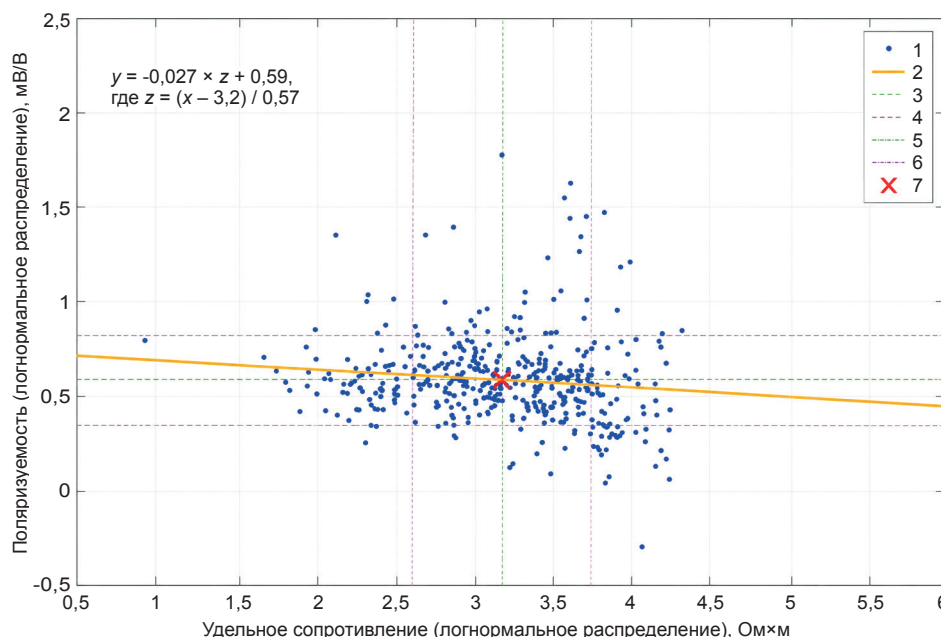


Рис. 5. Результат кластеризации удельного сопротивления и поляризуемости для образцов нерудных (вмещающих) пород:

1 – не содержащие руду образцы; 2 – линейная зависимость; 3 – среднее значение X; 4 – стандартное отклонение X; 5 – среднее значение Y; 6 – стандартное отклонение Y; 7 – центр оид кластера

Fig. 5. Resistivity and chargeability clustering results for non-ore (host) rock samples:

1 – non-ore samples; 2 – linear dependence; 3 – X mean value; 4 – X standard deviation; 5 – Y mean value; 6 – Y standard deviation; 7 – cluster centroid

водности за счет взаимосвязи рудных минералов. Повышенная поляризуемость также подтверждает наличие рассеянных металлических фаз, способствующих эффектам вызванной поляризации.

В целом этот кластер соответствует экономически перспективным железорудным зонам.

Кластер 2 (нерудные вмещающие породы). Этот кластер характеризуется низкой магнитной восприимчивостью, низкой поляризуемостью, низкой плотностью и высоким удельным сопротивлением. Он отражает слабоминерализованные вмещающие породы, в которых преобладают силикатные и непроводящие минералы.

Слабый магнитный отклик указывает на минимальное содержание ферромагнетиков, в то время как высокое удельное сопротивление свидетельствует о плохой электропроводности и ограниченном присутствии металлических минералов. Низкая поляризуемость подтверждает отсутствие значительных вкраплений рудных минералов. Этот кластер представляет собой фоновые геологические образования с низким потенциалом для разведки.

Наконец, четкие петрофизические различия между двумя кластерами демонстрируют, что магнитная восприимчивость и удельное сопротивление являются наиболее диагностическими параметрами, в то время как поляризуемость обеспечивает дополнительную избирательность. Это подтверждает, что кластерный анализ является эффективным методом отделения железорудного оруденения от вмещающих пород в районе исследования (табл. 3).

Заключение

Сравнение физических свойств образцов, содержащих железную руду, и нерудных вмещающих пород показывает четкие и последовательные петрофизические различия. Образцы, содержащие железную руду, обладают значительно более высокой плотностью, поляризуемостью и магнитной восприимчивостью, в то время как их удельное сопротивление значительно ниже, чем у вмещающих пород. Эти различия убедительно указывают на наличие богатой магнетитом и проводящей минерализации в пределах рудных зон.

Повышенная магнитная восприимчивость подтверждает сильный ферромагнитный от-



Таблица 3. Значения центроидов физических свойств руды и вмещающих пород в районе месторождения Баргилт

Table 3. Centroid values of physical properties of ore and host rocks in Bargilt area

Тип горной породы	N	Плотность (стандартное отклонение), кг/м ³	Удельное сопротивление (стандартное отклонение), Ом×м	Поляризуемость (стандартное отклонение), мВ/В	Магнитная восприимчивость (стандартное отклонение), ×10 ⁻⁵ СИ
Нерудные (вмещающие) образцы горных пород	440	2727 (±204)	1637 (×/÷3,72)	3,73 (×/÷1,7)	72 (×/÷4,26)
Образцы, содержащие железную руду	59	3555 (±534)	63 (×/÷5,01)	139 (±64,4)	316228 (×/÷3,98)

Примечание. N – количество выборок, участвующих в статистике.

клик, вероятно, обусловленный содержанием магнетита. Пониженное удельное сопротивление свидетельствует о повышенной электропроводности, связанной с распределением минералов в руде, в то время как высокая поляризуемость отражает присутствие вкрапленных металлических минералов, способствующих эффектам вызванной поляризации. Напротив, вмещающие породы характеризуются меньшей плотностью и слабыми петрофизическими характеристиками, что указыва-

ет на относительно пустую или слабоминерализованную литологию.

В целом комплексный анализ физических свойств показывает, что методы магнитного, электрического сопротивления и вызванной поляризации являются высокоэффективными для выделения железистого рудопроявления из окружающих вмещающих пород и обеспечивают надежную основу для геофизических исследований и интерпретации исследуемой территории.

Список источников

1. Telford W.M., Geldart L.P., Sheriff R.E. Applied geophysics. Cambridge: Cambridge University Press, 1990. 807 p.
2. Dentith M., Mudge S.T. Geophysics for the mineral exploration geoscientist. Cambridge: Cambridge University Press, 2014. 454 p.
3. Menke W. Geophysical data analysis: discrete inverse theory. London: Academic press, 2018. 342 p. <https://doi.org/10.1016/C2016-0-05203-8>.
4. Вахромеев Г.С., Давыденко А.Ю. Моделирование в разведочной геофизике. М.: Недра, 1987. 192 с.
5. Schön J.H. Physical properties of rocks: fundamentals and principles of petrophysics. Amsterdam: Elsevier, 2015. 512 p.
6. Yang T., Gao J., Gu Z., Dagva B., Tserenpil B. Petrophysical properties (density and magnetization) of rocks from the Suhbaatar-Ulaanbaatar-Dalandzadgad geophysical profile in Mongolia and their implications // The Scientific World Journal. 2013. Vol. 1. P. 791918. <https://doi.org/10.1155/2013/791918>.
7. Konstantinov K.M., Kuzina D.M., Khoroshikh M.S. Petrophysical taxa of diamond deposit of Komsomolskaya kimberlite pipe (Yakutsk diamondiferous province) // Науки о Земле и недропользование. 2024. Т. 47. № 2. С. 190–219. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2024-47-2-190-219>. EDN: TBAMTC.
8. Emerson D.W. Physical properties of skarns // Exploration Geophysics. 1986. Vol. 17. Iss. 4. P. 201–212. <https://doi.org/10.1071/EG986201>.
9. Sandrin A., Elming S.-Å. Geophysical and petrophysical study of an iron oxide copper gold deposit in northern Sweden // Ore Geology Reviews. 2006. Vol. 29. Iss. 1. P. 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2005.06.001>.
10. Navaanchimed A., Khuut T., Turtogtokh B., Sengee M., Purev D., Kh K. Geophysical exploration for skarn-type iron deposits in western Mongolia // SEG Global Meeting Abstracts: proceedings of the 12th SEGJ International symposium (Tokyo, 18–20 November 2015). Tokyo: Society of Exploration Geophysicists, 2015. P. 221–223. <https://doi.org/10.1190/segj122015-072>.
11. Turai E., Turtogtokh B., Dobróka M., Baracza M.K. Newer results of Monte Carlo inversion of IP data in water base protection and ore exploration // Acta Geodaetica et Geophysica. 2021. Vol. 56. Iss. 4. P. 667–679. <https://doi.org/10.1007/s40328-021-00352-6>.
12. Akimoto S. Magnetic properties of FeO–Fe₂O₃–TiO₂ system as a basis of rock magnetism // Journal of the Physical Society of Japan. 1962. Vol. 17. Suppl. B1. P. 706–710.
13. Henkel H. Standard diagrams of magnetic properties and density – a tool for understanding magnetic petrology // Journal of Applied Geophysics. 1994. Vol. 32. Iss. 1. P. 43–53. [https://doi.org/10.1016/0926-9851\(94\)90008-6](https://doi.org/10.1016/0926-9851(94)90008-6).
14. Clark D.A., Emerson J.B. Notes on rock magnetization characteristics in applied geophysical studies // Exploration Geophysics. 1991. Vol. 22. Iss. 3. P. 547–555. <https://doi.org/10.1071/EG991547>.
15. Clark D.A. Magnetic petrophysics and magnetic petrology: aids to geological interpretation of magnetic surveys // AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics. 1997. Vol. 17. Iss. 2. P. 83–103.



16. Leväniemi H., Hokka J. Petrophysical target characterization with lithogeochemical clustering: the Metsämonttu Zn–Pb–Cu deposit, southern Finland // *Near Surface Geophysics*. 2022. Vol. 20. Iss. 6. P. 637–660. <https://doi.org/10.1002/nsg.12182>.
17. Davis J.C. *Statistics and data analysis in geology*. New York: John Wiley & Sons, 1986. 663 p.
18. Everitt B., Hothorn T. *An introduction to applied multivariate analysis with R*. New York: Springer, 2011. 289 p.
19. Chapman S.J. *MATLAB programming for engineers*. Boston: Brooks/Cole-Thomson Learning, 2002. 478 p.

References

1. Telford W.M., Geldart L.P., Sheriff R.E. *Applied geophysics*. Cambridge: Cambridge University Press; 1990, 807 p.
2. Dentith M., Mudge S.T. *Geophysics for the mineral exploration geoscientist*. Cambridge: Cambridge University Press; 2014, 454 p.
3. Menke W. *Geophysical data analysis: discrete inverse theory*. London: Academic press; 2018, 342 p. <https://doi.org/10.1016/C2016-0-05203-8>.
4. Vakhromeev G.S., Davydenko A.Yu. *Modeling in exploration geophysics*. Moscow: Nedra; 1987, 192 p. (In Russ.).
5. Schön J.H. *Physical properties of rocks: fundamentals and principles of petrophysics*. Amsterdam: Elsevier; 2015, 512 p.
6. Yang T., Gao J., Gu Z., Dagva B., Tserenpil B. Petrophysical properties (density and magnetization) of rocks from the Suhbaatar–Ulaanbaatar–Dalandzadgad geophysical profile in Mongolia and their implications. *The Scientific World Journal*. 2013;1:791918. <https://doi.org/10.1155/2013/791918>.
7. Konstantinov K.M., Kuzina D.M., Khoroshikh M.S. Petrophysical taxa of diamond deposit of Komsomolskaya kimberlite pipe (Yakutsk diamondiferous province). *Earth sciences and subsoil use*. 2024;47(2):190-219. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2024-47-2-190-219>. EDN: TBAMTC.
8. Emerson D.W. Physical properties of skarns. *Exploration Geophysics*. 1986;17(4):201-212. <https://doi.org/10.1071/EG986201>.
9. Sandrin A., Elming S.-Å. Geophysical and petrophysical study of an iron oxide copper gold deposit in northern Sweden. *Ore Geology Reviews*. 2006;29(1):1-18. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2005.06.001>.
10. Navaanchimed A., Khuut T., Turtogtokh B., Sengge M., Purev D., Kh K. Geophysical exploration for skarn-type iron deposits in western Mongolia. In: *SEG Global Meeting Abstracts: proceedings of the 12th SEGJ International symposium*. 18–20 November 2015, Tokyo. Tokyo: Society of Exploration Geophysicists; 2015, p. 221-223. <https://doi.org/10.1190/segj122015-072>.
11. Turai E., Turtogtokh B., Dobróka M., Baracza M.K. Newer results of Monte Carlo inversion of IP data in water base protection and ore exploration. *Acta Geodaetica et Geophysica*. 2021;56(4):667-679. <https://doi.org/10.1007/s40328-021-00352-6>.
12. Akimoto S. Magnetic properties of FeO–Fe₂O₃–TiO₂ system as a basis of rock magnetism. *Journal of the Physical Society of Japan*. 1962;17(B1):706-710.
13. Henkel H. Standard diagrams of magnetic properties and density – a tool for understanding magnetic petrology. *Journal of Applied Geophysics*. 1994;32(1):43-53. [https://doi.org/10.1016/0926-9851\(94\)90008-6](https://doi.org/10.1016/0926-9851(94)90008-6).
14. Clark D.A., Emerson J.B. Notes on rock magnetization characteristics in applied geophysical studies. *Exploration Geophysics*. 1991;22(3):547-555. <https://doi.org/10.1071/EG991547>.
15. Clark D.A. Magnetic petrophysics and magnetic petrology: aids to geological interpretation of magnetic surveys. *AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics*. 1997;17(2):83-103.
16. Leväniemi H., Hokka J. Petrophysical target characterization with lithogeochemical clustering: the Metsämonttu Zn–Pb–Cu deposit, southern Finland. *Near Surface Geophysics*. 2022;20(6):637-660. <https://doi.org/10.1002/nsg.12182>.
17. Davis J.C. *Statistics and data analysis in geology*. New York: John Wiley & Sons; 1986, 663 p.
18. Everitt B., Hothorn T. *An introduction to applied multivariate analysis with R*. New York: Springer; 2011, 289 p.
19. Chapman S.J. *MATLAB programming for engineers*. Boston: Brooks/Cole-Thomson Learning; 2002, 478 p.

Информация об авторах / Information about the authors



Бямбасурэн Туртогтох,

доктор наук,
старший преподаватель,
директор научно-производственного и учебного центра геофизики,
Монгольский университет науки и технологий,
г. Улан-Батор, Монголия,
✉ Byamba0324@must.edu.mn
<https://orcid.org/0000-0002-7711-0326>

Turtogtokh Byambasuren, PhD,

Senior Lecturer,
Director of the Research, Production, and Educational Center of Geophysics,
Mongolian University of Science and Technology,
Ulaanbaatar, Mongolia,
✉ Byamba0324@must.edu.mn
<https://orcid.org/0000-0002-7711-0326>



Цогт Тумур,
магистр,
главный инженер,
Обогащительный комбинат «Бор-Ундур»,
провинция Хэнтий, Монголия,
tomor.0328@gmail.com
Tumur Tsogt,
Master of Science,
Chief Engineer,
Bor-Undur Mineral Processing Plant,
Khentii Province, Mongolia,
tomor.0328@gmail.com



Хулан Улзиижаргал,
студент,
Монгольский университет науки и технологий,
г. Улан-Батор, Монголия,
eruhulan@gmail.com
Ulziiargal Khulan,
Student,
Mongolian University of Science and Technology,
Ulaanbaatar, Mongolia,
eruhulan@gmail.com



Уржинханд Содномдарджаа,
магистр,
преподаватель,
Монгольский университет науки и технологий,
г. Улан-Батор, Монголия,
urjinkhands@must.edu.mn
<https://orcid.org/0009-0004-0839-198x>
Sodnomdarjaa Urjinkhand,
Master of Science,
Lecturer,
Mongolian University of Science and Technology,
Ulaanbaatar, Mongolia,
urjinkhands@must.edu.mn
<https://orcid.org/0009-0004-0839-198x>

Вклад авторов / Contribution of the authors

Т. Бямбасурэн – разработка концепции, получение финансирования, предоставление ресурсов, научное руководство, административное руководство исследовательским проектом, написание черновика рукописи.

Т. Цогт – разработка методологии, проведение исследования, валидация результатов, редактирование рукописи.

У. Хулан – формальный анализ, курирование данных, визуализация, редактирование рукописи.

С. Уржинханд – проведение исследования, предоставление ресурсов, валидация результатов, редактирование рукописи.

Turtogtokh Byambasuren – conceptualization, funding acquisition, resources, supervision, project administration, writing – original draft.

Tumur Tsogt – methodology, investigation, validation, writing – editing.

Ulziiargal Khulan – formal analysis, data curation, visualization, writing – editing.

Sodnomdarjaa Urjinkhand – investigation, resources, validation, writing – editing.

Конфликт интересов / Conflict of interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflict of interests.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

**Информация о статье / Information about the article**

Статья поступила в редакцию 01.05.2026; одобрена после рецензирования 08.06.2026; принята к публикации 22.06.2026.

The article was submitted 01.05.2026; approved after reviewing 08.06.2026; accepted for publication 22.06.2026.
The article was submitted 22.04.2026; approved after reviewing 07.05.2026; accepted for publication 18.05.2026.