

**ИЗУЧЕНИЕ МАГНИТНОЙ ВОСПРИИМЧИВОСТИ ПОРОД
И ИЗУМРУДОНОСНЫХ СЛЮДИТОВ НА МАРИИНСКОМ
ИЗУМРУДНО-БЕРИЛЛИЕВОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ (СРЕДНИЙ УРАЛ)**

Иванченко В.С., Баженова Е.А. – Институт геофизики УрО РАН, Екатеринбург

Попов М.П. – Институт геологии и геохимии УрО РАН, Уральский государственный горный университет, Екатеринбург

Пелешко О.П. – АО «Мариинский рудник», Асбест

Аннотация. Рассмотрены вопросы изучения магнитной восприимчивости основных пород и рудного комплекса (изумрудноносных слюдитов и кварц-плагиоклазовых жил с бериллом) на самом известном уральском изумрудно-бериллиевом месторождении – Мариинском. Сделана попытка создания новой экспресс-методики изучения магнитной восприимчивости пород непосредственно в подземном руднике. Измерения были проведены на типовых породах и рудах по обнажениям в очистных (слоевые орта, заходки) и геологоразведочных выработках (рудные штреки) на горизонтах +15, –30, –120 м.

Урал, магнитная восприимчивость, слюдиты, кварц-плагиоклазовые жилы, изумрудно-бериллиевое сырьё.

**THE STUDY OF MAGNETIC SUSCEPTIBILITY
OF ROCKS AND IZUMRUDNYJ SLUDIO IN
THE MARIINSKY EMERALD-BERYLLIUM DEPOSIT (MIDDLE URALS)**

Ivanchenko V.S., Bazhenova E.A. – Institute of Geophysics UB of RAS, Yekaterinburg

Popov M.P. – Institute of Geology and Geochemistry UB of RAS, Ural state mining university, Yekaterinburg

Peleshko O.P. – Joint-stock company of the Mariinsky mine, Asbestos

Abstract. The questions of studying the magnetic susceptibility of the main rocks and ore complex (emerald mica and quartz-plagioclase veins with beryl) at the most famous Ural emerald-beryllium Deposit – Mariinsky are considered. An attempt is made to create a new Express method of studying the magnetic susceptibility of rocks directly in an underground mine. The measurements were performed on the model rocks and ores exploration production (ORT layer, zagadki) and exploration workings (ore drifts) on the horizon +15; –30; –120 m.

Ural, magnetic susceptibility, mica, quartz-plagioclase veins, emerald-beryllium raw materials.

Введение

Уральские изумрудные копи являются всемирно известным рудным районом, в котором расположены крупнейшие в России месторождения бериллиевых руд и ювелирных камней: изумруда, александрита и фенакита. Добыча самоцветов началась в 1831 году и не прекращается до сегодняшнего дня. Изумруд и александрит являются достаточно редкими и самыми дорогими камнями, добываемыми на Урале. В пределах Изумрудных копей единственным источником изумрудного и александритового сырья являются слюдитовые жилы, которые встречаются на контакте серпентинитов в тальк-хлоритовых поро-

дах. Добыча в настоящее время осуществляется шахтным способом. Возникает вопрос: как при шпуровом бурении в условиях горных выработок разделить продуктивные участки от вмещающих пород. Наиболее простым и доступным способом разделения различного типа горных пород является метод измерения магнитной восприимчивости. В работе (Оценка ... , 2008) были исследованы физические свойства основных горных пород уральской изумрудноносной полосы, таких как плотность и магнитная восприимчивость. Магнитная восприимчивость гипербазитов характеризуется повышенными по отношению к жильным слюдитовым зонам значениями.

Авторы связывают это с аксессуарным магнетитом. Также установлена значительная неоднородность гипербазитов по величине магнитной восприимчивости, что обусловлено в основном их серпентинизацией, карбонатизацией, оталькованием. Породы основного и кислого состава в основном немагнитные, что значительно облегчает задачу выделения гипербазитов.

Однако в работе авторы (Оценка ... , 2008) отмечают и повышенные магнитные аномалии, заверенные горно-буровыми работами, обусловленные гранито-гнейсами, габбро-амфиболитами. Как правило, указанные породы с повышенными магнитными свойствами приурочены к зонам тектонических нарушений, и магнитные аномалии здесь имеют линейный характер. Рудные зоны в целом, как правило, на общем высоком магнитном поле выделяются локальными минимумами $\Delta Z(\Delta T)$.

В настоящей статье приведены результаты измерений магнитной восприимчивости непосредственно в условиях естественного залегания на Мариинском месторождении.

Объект исследования

Мариинское (Малышевское) месторождение входит в группу месторождений под общим названием Изумрудные копи Урала. Рудное поле, к которому принадлежит месторождение, располагается в восточной экзоконтактовой полосе крупного Адуйского гранитного массива позднеорогенного типа. Граниты прорывают сложный комплекс метаморфических и интрузивных пород, который включает: амфиболиты и амфиболитовые сланцы, углисто-кремнистые сланцы, серпентинизированные ультрабазиты и возникшие по ним серпентиниты и тальковые сланцы, диориты, кварцевые диориты и диоритовые порфириды. Контакт гранитного массива с комплексом метаморфических и интрузивных пород имеет восточное падение под углом $65-80^\circ$ и осложнен перегибами с пологими участками и прогибами.

К одному из таких прогибов и приурочено Мариинское месторождение (Попов,

2014). Рудное поле локализуется в восточном крыле антиклинальной складки. Главными рудоконтролирующими и рудораспределяющими структурами на месторождении являются пространственно связанные между собой зоны разломов и дайки диоритовых порфиридов (Золотухин, 1996). Зоны разломов фиксируются сильно рассланцованными и перемятыми тальковыми сланцами (обычно с примесью хлорита, актинолита и флогопита), среди которых наблюдаются линзообразные тела серпентинитов, а также дайки диоритовых порфиридов и отдельные пластообразные тела углисто-кремнистых сланцев. В зонах разломов сосредоточено большинство рудных тел, ориентированных преимущественно в близмеридиональном и реже – широтном направлениях. В зонах разломов и в примыкающих к ним участках все породы подвержены тектоническому разлинцованию и интенсивной метасоматической проработке – флогопитизации, флюоритизации, оталькованию (серпентиниты). Кроме того, в зонах разломов наблюдается наиболее интенсивное образование бериллиевой минерализации. В плане и на вертикальных разрезах зоны рассланцевания нередко соединяются и вновь расходятся, часто отмечаются их пережимы и раздувы. Отмечено также, что иногда от основных зон разломов отходят отдельные оперяющие ветви, на участках сопряжения которых с разломами образуются крупные рудные столбы. Зоны разломов прослеживаются по простиранию до 1200 метров, мощность их изменяется от 5 до 70 метров. Важную роль в формировании структуры рудного поля месторождения играют также дайки диоритовых порфиридов. По простиранию и падению рудной зоны прослеживаются, согласно с ней залегающие, пять наиболее крупных даек, длина которых достигает 1150 метров при мощности от 5 до 10 метров. Дайковые тела пространственно тесно связаны с выделенными крупными зонами разломов, и развитие рудоносных структур происходит именно здесь, то есть на участках проявления даек, создающих явно выраженную механиче-

скую неоднородность вмещающих пород. Магматические расплавы, из которых кристаллизовались дайки, использовали тектонически ослабленные зоны вдоль контактов различных пород. Эти же зоны являлись и главными подводящими каналами для рудоносных растворов. Кроме того, дайки играли роль своеобразных экранов, способствующих концентрации рудоносных растворов и конденсации летучих компонентов (Золотухин, 1996).

На месторождении выделяются три разлома: Западный, Центральный, Крестовский. Первый и второй разломы приурочены к восточному крылу антиклинальной складки, а Крестовский разлом фиксируется в пределах синклинали складки в согласном залегании с породами, участвующими в строении складчатой структуры. Простираание Центрального и Западного разломов близмеридиональное, падение восточное под углами 45–90°, Крестовский разлом имеет северо-западное (315–330°) простираание, с падением на северо-восток и юго-запад под углами 50–80°. Жильные свиты рудной зоны месторождения прослеживаются по простираанию и падению в пределах выделенных одноименных разломов. В контурах зон разломов сосредоточена основная масса рудных тел по сравнению с участками, расположенными между разломами. Трещинные структуры в пределах месторождения приобретают первостепенную роль. Размеры, морфология, элементы залегания рудных тел тесно связаны с характером и степенью трещиноватости вмещающих пород. На месторождении выделяются два генетических типа трещин: скальвания (согласные с напластованием горных пород и секущие их) и отрыва. Согласно трещины скальвания фиксируются в пределах зон разломов и на контакте этих разломов с дайками диоритовых порфиритов. Трещины этого типа являются наиболее выдержанными по простираанию и падению (Попов, 2014).

Рудная зона месторождения имеет южное склонение под углом 50°. По простираанию она прослежена на 1100 м (горизонт – 30 метров), а на глубину разведана до 360–

500 метров. Жильный комплекс представлен изумрудоносными слюдитовыми и бериллоносными кварцплагиоклазовыми жилами. Слюдитовые рудные тела являются единственными носителями изумрудов. Окраска их обязана, главным образом, более повышенному содержанию в берилле хрома, заимствованного из вмещающих пород серпентинитов и тальковых сланцев. Содержание Cr_2O_3 в серпентинитах составляет 0,15–0,53%, в тальковых сланцах 0,22–0,52%. Во флогопите слюдитовых жил содержание Cr_2O_3 уменьшается (0,027–0,25%). Изумруды содержат 0,25 Cr_2O_3 , а светло-зелёные бериллы лишь 0,06%. Кварц-плагиоклазовые рудные тела являются типичными трещинными жилами, которые залегают в различных породах и приурочены к трещинам обоих генетических типов. Кварц-плагиоклазовые жилы преимущественно залегают в диоритовых порфиритах, а также в тальковых сланцах и серпентинитах (Попов, 2014). Однако кварц-плагиоклазовые жилы, в отличие от слюдитовых рудных тел, встречаются и в других породах (амфиболитах, кварцитах), обычно также пространственно связанных с дайками диоритовых порфиритов. Мощность слюдитовых жил в диоритовых порфиритах примерно в два раза меньше мощности этих же рудных тел, вмещающими породами которых являются тальковые сланцы. Литологический контроль бериллиевого оруденения в кварц-плагиоклазовых жилах определяется, главным образом, влиянием физических свойств вмещающих пород и ещё в большей степени, чем в слюдитовых жилах, тесно связан со структурным контролем. Образование разнообразных по минералогическому составу рудных тел этого типа (плагиоклаз-кварцевые, плагиоклаз-мусковит-кварцевые, плагиоклазовые, берилл-плагиоклазовые, мусковит-плагиоклазовые, флюорит-берилловые и смешанного состава), связанных с проявлением второй стадии пневматолито-гидротермального процесса, несомненно зависело от химико-минералогического состава вмещающих пород. Изумруды в кварц-

плагноклазовых жилах вообще отсутствуют, что объясняется приуроченностью большинства (68%) жил этого типа к диоритовым порфиристам, почти не содержащим хрома (следы – 0,005% Cr₂O₃), и уменьшением степени взаимодействия рудоносных растворов с вмещающими породами во вторую стадию пневматолит-гидротермального процесса. Гидротермальные образования (кварцевые жилы в амфиболитах, плагноклаз-кальцитовые прожилки в актинолитовых сланцах, диоритовых порфиристах и амфиболитах и доломитовые прожилки с фенакитом в серпентинитах) в пределах рудного поля месторождения имеют незначительное распространение, не содержат изумруды и не представляют практический интерес на бериллий.

Рудная зона подразделяется на три основные жильные свиты: Западную, Центральную и Крестовскую, приуроченные к одноименным зонам разломов. Центральная свита наиболее насыщена рудными телами и является самой крупной по запасам бериллиевой руды (67%) и изумрудов (91%). Крестовская жильная свита практического значения не имеет (2% руды), а жилы Западной свиты представляют интерес только как источник бериллия. Количество (частота) слюдитовых жил в Центральной свите составляет 90%, а в Западной лишь 30% от общего числа жил, соответственно. Основные запасы бериллиевой руды (85%) и изумрудов (94%) сосредоточено в северной и центральных частях месторождения (Золотухин, 1996).

На глубине рудная зона, особенно в северной и центральных частях месторождения, прослеживается довольно отчетливо. Выклинивание рудных тел на глубине 180–220 метров от дневной поверхности установлено только на северном фланге месторождения. В центральной части месторождения рудная зона фиксируется без признаков выклинивания. На южном участке наблюдается «разброс» рудных тел глубже 400–500 метров, но до глубины 800 метров от дневной поверхности не отмечено полного выклинивания жил. По данным

бурения глубокой поисково-структурной скважины 1991-с, рудная зона в южной части Мариинского месторождения вскрыта на глубине 1100 метров (по вертикали) без признаков выклинивания. На рис. 1 (цветная вкладка) приведен геологический план Мариинского месторождения.

Используемая аппаратура и методика измерений

Для выполнения измерительных работ использовался измеритель магнитной восприимчивости полевой ПИМВ-М с диапазоном измерения $1 \cdot 10^{-5}$ –1 ед. СИ. Измерение проводилось путем плотного прикладывания плоской поверхности первичного преобразователя прибора к стенке забоя в литологически однородный участок, с последующим измерением и записью полученного значения в полевой журнал документации горных выработок. При этом исследуемые поверхности забоев являлись неровными (шероховатыми), и величина зазора между прибором и исследуемой поверхностью составляла от 3 до 7 мм, в среднем 5 мм.

Обработка результатов

Так как прибор ПИМВ-М измеряет кажущуюся магнитную восприимчивость (k'), а переход к значению истинной магнитной восприимчивости (k) реализуется по формуле (Вонсовский, 1971):

$$k = \frac{k'}{1 - 0,5k'}$$

но ввиду того, что все полученные значения кажущейся магнитной восприимчивости меньше 0,1 ($k' \leq 0,1$ ед. СИ), то было принято считать, что $k = k'$. Из-за того, что стенки забоя являются неровными, т. е. присутствует разность «выступ–углубление» в результате чего зазор между измеряемой поверхностью и плоской поверхностью первичного преобразователя в среднем составляет 0,5 мм, то для расчета магнитной восприимчивости был введен поправочный коэффициент на неровность забоя равный 1,41. Относительная погрешность измерения не превосходит $\pm 10\%$ в диапазоне (10^{-4} ... 1) ед. СИ, в диапазоне (10^{-5} ... 10^{-4}) ед. СИ не нормируется.

Результаты измерений

Измерению были подвергнуты типовые породы и руды Мариинского месторождения. Магнитная восприимчивость ультраосновных пород характеризуется от $2,5 \times 10^{-5}$ до 20×10^{-5} ед. СИ, а отдельных случаях до 201×10^{-5} ед. СИ. В среднем магнитная восприимчивость серпентинитов $10,2 \times 10^{-5}$ ед. СИ. Повышенные магнитные свойства гипербазитов связаны с аксессуарным магнетитом. Породы основного и кислого состава в основном слабомагнитные. Слюдитовые комплексы отличаются самой низкой магнитной восприимчивостью, в среднем $2,1 \times 10^{-5}$ ед. СИ. Близкими к ним значениями магнитной восприимчивости обладают хлоритовые сланцы $3,8 \times 10^{-5}$ ед. СИ, нулевым значением магнитной восприимчивости у кварц-плагиоклазовых жил. Это связано с полным отсутствием каких-либо магнитных минералов в их составе. Средние показатели магнитной восприимчивости основных пород Мариинского месторождения приведены в табл. 1.

Обсуждение результатов

Средние значения магнитной восприимчивости различных пород и руд Мариинского изумрудно-бериллиевого месторождения близки, за исключением серпентинитов. Неравномерность в намагниченности пород свидетельствует о связи магнитных свойств с присутствующими в них ак-

цессорными минералами. В серпентинитах наиболее часто встречается магнетит ($10^6 - 10^7 \times 10^{-5}$ ед. СИ), хромит. В диоритовых порфиритах – пирротин ($10^3 - 10^7 \times 10^{-5}$ ед. СИ), ильменит ($10^6 \times 10^{-5}$ ед. СИ) и титанит, реже магнетит. В тальковых, хлоритовых и тремолит-актинолитовых сланцах достаточно часто присутствуют магнетит, ильменит, которые влияют на общую магнитную восприимчивость пород. Слюдитовые комплексы в основном состоят из флогопита ($10^{-1} \times 10^{-5}$ ед. СИ), но в них редко встречается хромит, ильменит, титанит. Содержание аксессуарных минералов в слюдитах не превышает сотых и тысячных долей процентов. Иногда в аподиоритовых слюдитах есть микровключения мелкозернистого магнетита, которые увеличивают общую магнитную восприимчивость данных пород. Значение магнитной восприимчивости кварц-плагиоклазовых жил ниже предела измерения прибора ПИВМ-М ($k < 10^{-5}$ ед. СИ) в виду отсутствия в них основных «магнитных минералов» (магнетита, пирротина, ильменита).

Выводы

Использование данной экспресс-методики на месте (непосредственно в горных выработках) позволит оперативно определять нахождение серпентинитовых тел и тальковых сланцев, в контакте которых встречаются продуктивные на изумруды слюдитовые комплексы. Чаще всего, в подземных горных выработках при плохом

Таблица 1. Средние показатели магнитной восприимчивости основных пород Мариинского месторождения

Названия пород	Число замеров	Среднее (χ), 10^{-5} ед. СИ	Среднее с учетом коэффициента 1,41, 10^{-5} ед. СИ
Серпентиниты	25	7,2	10,2
Тальковые сланцы и породы	39	3,4	4,8
Диоритовые порфириты и кварцевые диориты	62	5,2	7,3
Тремолит-актинолитовые сланцы	13	3,1	4,4
Хлоритовые сланцы	7	2,7	3,8
Кварц-плагиоклазовые жилы	10	-	-
Слюдитовые комплексы	43	1,5	2,1
Угристо-кремнистые сланцы	10	5	7,1

освещении и запыленности, это сделать бывает затруднительно. Данный метод, при наборе большой статичности, позволит отличать продуктивные на качественное камнесамоцветное сырье (изумруд, александрит) апогипербазитовые слюдиты от непродуктивных аподиоритовых и прочих слюдитовых комплексов. Необходимо также исследование других физических характеристик основных типов руд и пород (например, электросопротивление) для более качественного выделения продуктивных зон.

Работа выполнена при финансовой поддержке Проекта 18-5-5-52, а также частично за счет проекта «Реконструкция условий формирования габбро-ультрабазитовых комплексов Урало-Монгольского складчатого пояса и связанного с ними оруденения» – № г/р АААА-А18-118052590033-3.

Литература

Вонсовский С.В. Магнетизм. М.: Наука, 1971. 1032 с.

Золотухин Ф.Ф. Мариинское (Мальшевское) месторождение изумруда, Средний Урал. Асбест-Екатеринбург. СПб.: Изд-во СПбГУ, 1996. 70 с.

Оценка ресурсного потенциала изумрудоносных формаций России на основе разработки современных прогнозно-поисковых комплексов. М.: ФГУП «Центркваец», 2008. 246 с. (Отчёт о результатах геолого-разведочных работ за 2007–2008 гг.).

Попов М. П. Геолого-минералогические особенности редкометальной минерализации в восточном экзоконтакте Адуйского массива в пределах уральской изумрудоносной полосы. Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2014. 136 с.