

Муниципальное автономное общеобразовательное учреждение
«Средняя общеобразовательная школа №19 им. Л.А. Попугаевой»

НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ РАБОТА

по физике

**Магнитные свойства вещества в поиске полезных
ископаемых и магниторазведке**

Выполнил: Мазнев Матвей
ученик 10 «Б» класса

Руководитель:
Криволапова Д.И.
учитель физики

город Удачный, 2022 г

Содержание

Введение	3
1 Теоретическая часть	6
1.1 Общий обзор методов поиска месторождений полезных ископаемых ...	6
1.2 Магниторазведка: характеристика и история.....	7
1.3 Магнитное поле Земли.....	10
1.4 Магнитостатиграфическая шкала	11
1.5 Классификация магнитных свойств руд и горных пород	12
1.6 Аппаратура для магниторазведки.....	13
Феррозондовые магнитометр	14
Протонные магнитометры	14
Квантовые магнитометры	15
1.7 Применение магнитной разведки.....	16
2 Практическая часть.....	17
Исследование образцов горных пород на магнитную восприимчивость	17
Заключение.....	20
Список используемых источников.....	21

Введение

Основу экономики Республики Саха (Якутия) составляет промышленность, развитие которой связано с освоением богатейших природных ресурсов. Состав и пространственное распределение недровых богатств Республики Саха (Якутия) обусловлены разнообразием геоструктурных зон ее территории. Удельный вес запасов Республики Саха (Якутия) в минерально-сырьевом потенциале России составляет: по алмазам 82%, по золоту 17%, по урану 61%, сурьме 82%, железным рудам 5%, углю 5%, олову 28%, ртути 8%. Имеются значительные запасы редкоземельных элементов, серебра, свинца, цинка, вольфрама и т.д. вплоть до последних элементов таблицы Менделеева.

Ведущее место в горной промышленности республики занимает алмазодобывающая отрасль. Однако в последние годы здесь заметна не самая благоприятная тенденция: обнаружение новых алмазоносных кимберлитовых трубок, месторождений железной руды и др. полезных ископаемых стремится к нулю.

В советскую эпоху для открытия полезных ископаемых досконально изучались в первую очередь территории с относительно простыми геологическими условиями. И все стандартные методы поиска месторождений демонстрировали эффективность. По мере освоения месторождений акцент геологоразведки стал смещаться на удаленные районы с более сложными ландшафтно-геологическими условиями, большим числом слабоамплитудных магнитных аномалий, большой мощностью перекрывающих отложений, которые затрудняют обнаружение кимберлитов и полезных ископаемых.

Территории с месторождениями имеют контрастные физические свойства относительно вмещающей среды, приборы показывают аномалию магнитного поля. К сожалению, магнитные аномалии могут создаваться и приповерхностными неоднородностями. В таких условиях магниторазведку уже нельзя назвать эффективной. По аналогичным причинам низкие результаты в геологически сложных районах дают также гравиразведка и электроразведка (электрметрия).

Тем не менее, магниторазведка является одним из наилучших методов при разведке малоглубинных подземных объектов.

При поиске железорудных месторождений магниторазведка является достаточно информационной и экономичной. Традиционным вариантом магниторазведки является пешеходная съемка. Для повышения скорости изучения труднопроходимых территорий используют беспилотные технологии. Чтобы понять, насколько достоверны данные беспилотной аэромагнитной съемки на железорудных объектах Якутии были выполнены опытно-методические работы на уже хорошо изученном ранее крупнейшем железорудном месторождении Южной Якутии с использованием беспилотного комплекса «Геоскан 401»¹.

Данный подход позволил установить работоспособность полетного комплекса, сопоставив имеющиеся данные наземных магниторазведочных работ с данными аэромагниторазведочных работ. Анализ магнитных полей показал полную идентичность полученных аномалий наземной и аэромагнитной съемки. Более того, были выделены территории со слабой аномалией, которые не отражены в магнитном поле наземной съемки.

Данные исследования меня очень заинтересовали и я решил систематизировать и обобщить материал о магнитных свойствах геологических тел.

Актуальность темы состоит в том, что магниторазведка является одним из самых лучших методов разведки горных пород и минералов на огромных территориях РФ.

Цель исследования заключается в том, чтобы понять как магнитные свойства вещества используются в поиске полезных ископаемых и магниторазведке, с помощью датчиков цифровой лаборатории «RELEON» исследовать магнитные свойства образцов горных пород.

Объект исследований – магнитное поле Земли.

¹ Сясько А.А., Гриб Н.Н., Имаев В.С., Имаева Л.П., Колодезников И.И. Проведение детальных аэрогеофизических работ в сложнорасчлененных комплексах Сутамского террейна (Алданский щит) при изучении железорудных месторождений. *Геодинамика и тектонофизика*. 2020;11(1):141-150. <https://doi.org/10.5800/GT-2020-11-1-0468>

Предмет исследований – минералы способные намагничиваться и создавать магнитные поля.

Задачи исследования:

1. Изучение теоретических материалов по данной теме
2. Исследовать магнитные свойства различных веществ помощью датчиков цифровой лаборатории «RELEON»
3. Характеризовать магнитные свойства веществ

Практическая значимость проекта заключается в том, что во время работы будут систематизирован большой объём информации по теме.

1 Теоретическая часть

1.1 Общий обзор методов поиска месторождений полезных ископаемых

При поисках месторождений используются разнообразные методы, направленные на обнаружение самих залежей, а также всех видов аномалий, вызванных ими. В соответствии с этим методы поиска полезных ископаемых могут быть подразделены на геологические, минералогические, геохимические и геофизические.

Для большинства исследований используются физические свойства горных пород: электропроводность, радиоактивность, магнитные свойства и др. Современные геофизические методы позволяют обнаруживать и изучать физические свойства полезных ископаемых и горных пород с большой точностью и с больших расстояний.

Геофизические методы поиска полезных ископаемых:

1. сейсморазведка - геофизический метод геологоразведки, основанный на изучении распространения в земной коре упругих (сейсмических) волн, вызванных взрывом или ударом;
2. гравиразведка - геофизический метод, изучающий изменение ускорения свободного падения в связи с изменением плотности геологических тел, применяется при исследовании земной коры и верхней мантии, выявлении глубинных тектонических нарушений, поиске полезных ископаемых (преимущественно рудных), выделении алмазоносных трубок взрыва;
3. электроразведка основана на изучении естественных и искусственных электрических полей рудных тел или других геологических образований, используется различная проводимость электрического тока рудами и окружающими их горными породами; применяется для поисков и разведки медноколчеданных и других полиметаллических сульфидных месторождений и для решения многих, весьма разнообразных вопросов о геологическом строении исследуемых районов;

4. магниторазведка основана на изучении магнитного поля на поверхности земли, изменяющегося в зависимости от магнитных свойств полезных ископаемых и окружающих их горных пород;
5. радиометрия основана на изучении явлений радиоактивности, применяется для разведки руд, содержащих радиоактивные элементы, а также для отыскания и прослеживания зон тектонических разломов и частично для картирования и оконтуривания массивов некоторых, особенно кислых, изверженных пород.
6. геофизические исследования в скважинах (каротаж скважин) проводятся с целью уточнения документации геологического разреза, пройденного скважиной, и с целью изучения технического состояния скважин.

1.2 Магниторазведка: характеристика и история

Магнитометрическая, или магнитная, разведка (сокращенно магниторазведка) — это геофизический метод решения геологических задач, основанный на изучении магнитных неоднородностей литосферы по аномалиям магнитного поля Земли.

Для успешного применения магнитного метода разведки необходимо иметь условие, чтобы искомое полезное ископаемое или объект разведки имел возможно большую или, наоборот, меньшую степень намагничения по сравнению с окружающими породами, т. е. магнитным методом можно обнаруживать или более магнитные руды среди менее магнитных горных пород или наоборот — менее магнитные среди более магнитных.

Основные методы магниторазведки: полевые (пешеходные или автомобильные), воздушные, морские, подземные и скважинные наблюдения. По решаемым геологическим задачам: региональные (аэромагнитные и гидромагнитные), применяемые для изучения глубинного геологического строения глубинных территорий; картировочные (аэромагнитные и полевые) картирование с оценкой перспективности изучаемых областей; картировочно-поисковые (полевые) предназначено для крупномасштабного геологического

картирования; поисково-разведочные и детальные (полевые, подземные и скважинные) при которых решают задачи рудных тел, оценки их размеров, формы, положения, намагничивания.

В России специальные исследования магнитного поля с геологическими целями были проведены на Курской магнитной аномалии в конце XIX века. Первыми систематическими разведочными магнитными работами в России и в мире были съемки Курской магнитной аномалии (КМА), начатые профессором МГУ Э. Е. Лейстом в 1894 г., а также магнитные съемки, проведенные на Урале Д. И. Менделеевым и в районе Кривого Рога И. Т. Пассальским в конце позапрошлого века. В 1919 г. выдающимся советским геофизиком А. И. Заборовским были начаты магнитные съемки в Курской области на КМА, положившие начало генеральной магнитной съемке территории нашей страны и развитию всей отечественной разведочной геофизики.

Земля как космическое тело генерирует постоянное магнитное поле, называемое нормальным, или первичным. Многие горные породы и руды обладают магнитными свойствами и способны под воздействием этого поля приобретать намагниченность и создавать аномальные, или вторичные, магнитные поля. Выделение этих аномальных полей из наблюдаемого или суммарного геомагнитного поля, а также их геологическое истолкование являются целью магниторазведки.

От других методов разведочной геофизики магниторазведка отличается наибольшей производительностью, особенно в воздушном или аэроварианте. Магниторазведка является эффективным методом поисков и разведки железных руд. Однако ее широко применяют и при геологическом картировании, структурных исследованиях и поисках других полезных ископаемых.

Наземная магниторазведка применяется при решении следующих задач:

- поиски и разведка железорудных месторождений. Исследования начинаются с проведения аэромагнитных съемок. Железорудные месторождения выделяются очень интенсивными (сотни и тысячи нТл) аномалиями. Детализация аномалий проводится наземной съемкой. При этом ведется не

только качественная, но и количественная интерпретация, т.е. оценивается глубина залегания магнитных масс, простираения, падения, размеры железосодержащих пластов, а иногда по интенсивности намагничения даже качество руды.

- поиски полиметаллических, сульфидных, медно-никелевых, марганцевых руд, бокситов, россыпных месторождений золота, платины, вольфрама, молибдена и др. Это оказывается возможным благодаря тому, что в рудах в качестве примесей часто содержатся ферромагнитные минералы или же они сами обладают повышенной магнитной восприимчивостью (см. рисунок 2).

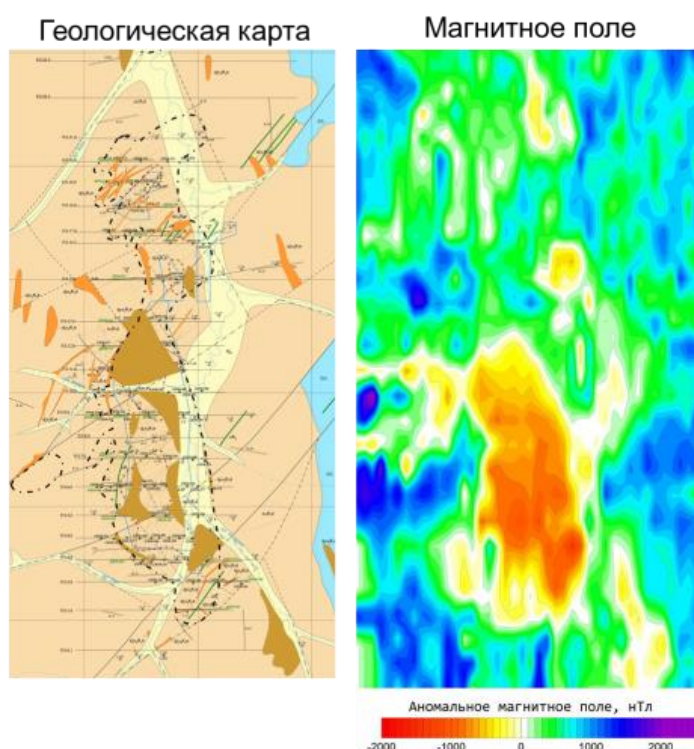
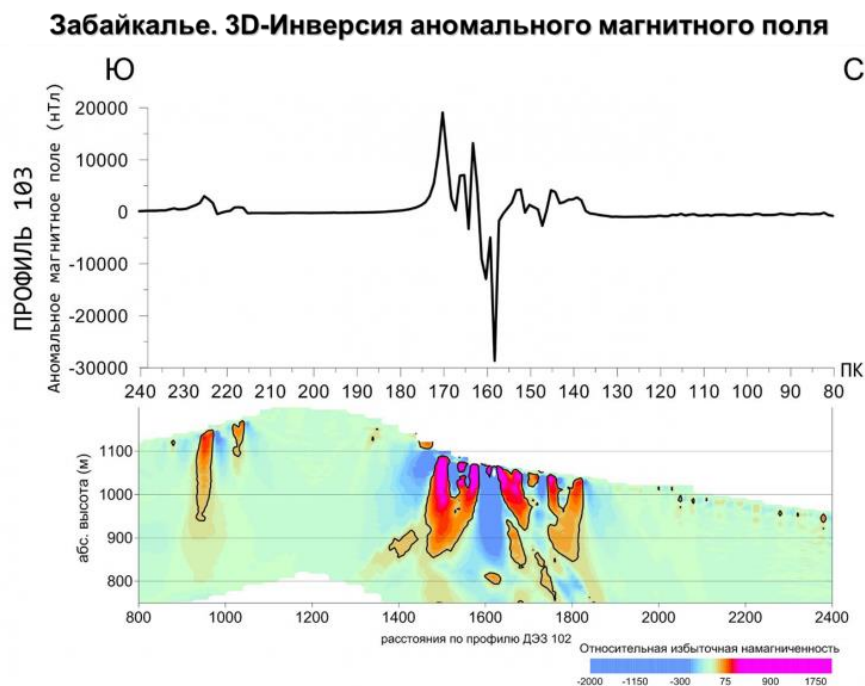


Рисунок 2 Чукотка. Баимская рудная зона

- картирование интрузий. Разделение интрузий по составу. Хорошие результаты при разведке кимберлитовых трубок (ультраосновные интрузии), к которым приурочены месторождения алмаза.



1.3 Магнитное поле Земли

Измерениями магнитного поля Земли было установлено, что величина и направление его в разных местах земной поверхности не одинаковы, а в зависимости от координат места изменяются в больших пределах.

Оказалось, что магнитное поле Земли по форме соответствует полю однородно намагниченного шара (см. рисунок 1).

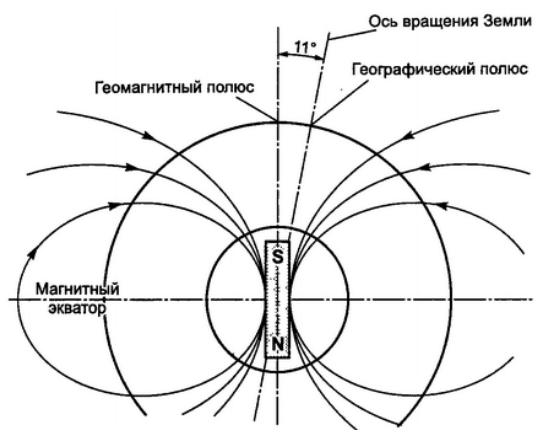


Рисунок 1 Схематическое изображение магнитного поля Земли

Это значит, что магнитное поле Земли создано в основном намагничением всего земного шара в направлении магнитной оси.

Магнитная ось наклонена к оси вращения земли под углом около 11° и проходит через точки земной поверхности, называемые магнитными полюсами, определяемыми приблизительно следующими координатами:

Северный магнитный полюс - 74° с.ш. 100° з.д.

Южный магнитный полюс - 69° ю.ш. 144° в.д.

Геомагнитное поле характеризуется склонением D , наклонением I и магнитной индукцией B , измеряемое в теслах.

Было установлено, что геомагнитное поле Земли последние 3,5 миллиардов лет принципиально не изменялось. В среднем интенсивность магнитного поля Земли колеблется от 25 до 65 мкТл.

Магнитное склонение меняется со временем. Регулярно составляются специальные карты с годовым изменением какого-либо элемента магнитного поля. Такие карты можно использовать не более 10 лет.

За время существования Земли её магнитное уже несколько раз меняло свою полярность. Это объясняется тем, что существуют противоположно намагниченные горные породы. Магнитная инверсия происходит параллельно со сдвигом полюсов.

1.4 Магнитостатиграфическая шкала

Магнитостатиграфическая шкала используется для решения многих задач: корреляция разрезов, уточнение возраста пород, выявление перерывов в осадконакоплении и оценка их объема.

Первая такая шкала была создана в 1963 году А. Коксом, Р. Доллом и Г. Далримплом для последних 3,5 миллионов лет. В этом интервале они установили две зоны прямой полярности и одну зоны обращенной. Так же большой вклад сделали Э. А. Молостовский, М. А. Певзнеров, Д. М. Печерский, В. П. Родионов, А. Н. Храмов в 1976 году для магнитостатиграфической шкалы фанерозоя. С тех пор составлено много магнитостатиграфических шкал, полнота которых увеличивается и дробление становится всё более дробным. На рисунке 3 показан пример магнитостатиграфической шкалы.

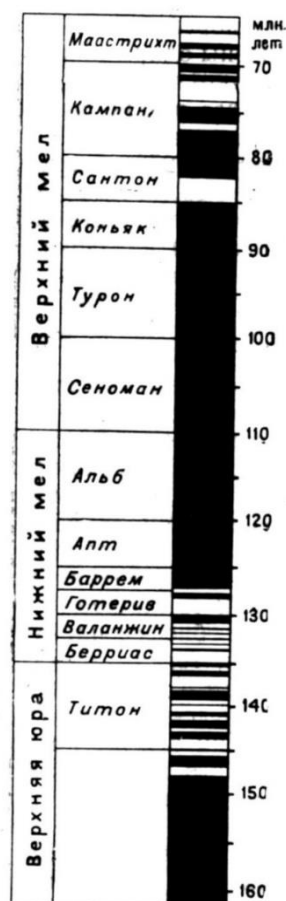


Рисунок 3 Геохронологическая шкала палеомагнитных инверсий

1.5 Классификация магнитных свойств руд и горных пород

По магнитным свойствам все вещества делятся на три группы: диамагнитные, парамагнитные и ферромагнитные.

Диамагнетики являются слабомагнитными веществами: они не магнитятся, если на них не действует магнитное поле. К диамагнетикам относятся кварц, каменная соль, мрамор, нефть, графит, золото, серебро, свинец, медь и др.

Парамагнитными свойствами обладает большинство горных пород и минералов: все осадочные породы (известняки, доломиты, песчаники, глины), многие метаморфические и магматические породы (граниты, гнейсы, роговики).

К ферромагнитным минералам относятся магнетит, титаномагнетит и ильменит.

Интенсивность магнитных аномалий зависит в основном от интенсивности намагничения рудных тел и горных пород. На основании исследований принято

считать, что полная интенсивность намагничения горных пород или рудных тел складывается из остаточного и индукционного намагничения. Остаточное намагничение образцов руд и горных пород проявляется в том, что они во многих случаях бывают намагничены и представляют собою как бы естественные магниты. Намагнитились они еще в момент образования и формирования горных пород из магмы и воздействию на них существовавшего ранее магнитного поля Земли. Так как направление земного поля раньше возможно было другим и ориентировка горных пород и рудных тел после образования и намагничения их из-за тектонических процессов могла измениться, то направление остаточного намагничения теперь может не совпадать с направлением индукционного намагничения современным полем Земли. Оно может создавать даже обратное намагничение.

Магнитная восприимчивость большинства горных пород определяется, прежде всего, присутствием и процентным составом ферромагнитных минералов. Среди изверженных пород наибольшей магнитной восприимчивостью обладают ультраосновные и основные породы, слабо- или умеренно магнитные кислые породы. У метаморфических пород магнитная восприимчивость обычно ниже, чем у изверженных. Осадочные породы, за исключением некоторых песчаников и глин, практически немагнитны.

Основной вклад в создание аномалий магнитного поля вносят ферромагнитные минералы и содержащие их горные породы. Так как в целом магнитная восприимчивость горных пород изменяется в больших пределах (в миллионы раз), то интенсивность аномалий магнитного поля варьирует от долей до сотен тысяч нанотесл. Для регистрации подобного поля необходима специальная аппаратура, имеющая и высокую чувствительность, и большой динамический диапазон измерений.

1.6 Аппаратура для магниторазведки

Приборы, используемые в магнитной разведке, называются магнитометрами. В настоящее время в основном применяют три типа магнитометров — феррозондовые, протонные и квантовые.

Феррозондовые магнитометр

Основой конструкции феррозонда (чувствительного элемента) феррозондового магнитометра (см. рисунок 4) служит электрическая катушка, намотанная на стержень из ферромагнетика, обладающего большой магнитной проницаемостью в слабых магнитных полях (например, из сплава железа, никеля и молибдена — пермаллоя).



Рисунок 4 Феррозондовый магнитометр

Для измерения внешнего магнитного поля обычно используют компенсационный метод, заключающийся в компенсации постоянного магнитного поля Земли полем постоянного регулируемого тока. По величине тока компенсации судят о напряженности магнитного поля Земли вдоль оси феррозонда. К таким приборам относится аэромагнитометр АМФ-21.

Протонные магнитометры

Принцип действия протонных, или ядерных, магнитометров основан на явлении свободной прецессии протонов в земном магнитном поле. После определенного электромагнитного воздействия на протонсодержащий датчик (с водой, спиртом, бензолом и др.) магнитные моменты протонов переориентируются вокруг направления вектора земного магнитного поля.

В зависимости от протонсодержащего вещества и точности определения частоты прецессии рабочий цикл (время одного измерения) составляет от десятых долей до первых единиц секунд. В этом случае при небольшой скорости движения носителя магнитометра (наземный или морской варианты) данные о магнитном поле Земли получают практически непрерывно. При большой скорости, например при скорости самолета (350 км/ч), расстояние между замерами может составить 300 м.

При использовании металлических носителей магнитометров (кораблей, самолетов, вертолетов), обладающих собственным магнитным полем, датчик магнитометра буксируют на кабеле, длина которого должна в несколько раз превышать продольные размеры носителя.

Протонные магнитометры используют при наземных (ММП-203, ММП-203М, ПОС, МИНИМАГ, ММПГ-1) и морских (ММП-3) съемках, реже при воздушных съемках (АМ-5, ММС-214) и скважинных наблюдениях.

Квантовые магнитометры

В квантовых магнитометрах (см. рисунок 6), предназначенных для измерения абсолютных значений модуля напряженности магнитного поля, используют так называемый эффект Зеемана. В электронной структуре атомов, обладающих магнитным моментом, при попадании в магнитное поле происходит изменение, приводящее к расщеплению энергетических уровней на подуровни, с разницей энергии и, соответственно, частотой излучения, пропорциональной модулю полного вектора магнитной индукции в точке наблюдения. Чувствительным элементом магнитометра является сосуд, в котором находятся пары цезия, рубидия или гелия. В результате воздействия специально отфильтрованного монохроматического света (метод оптической накачки) электроны паров переводятся с одного энергетического подуровня на другой. Возвращение электронов на прежний уровень после окончания накачки сопровождается излучением энергии с частотой, пропорциональной величине магнитного поля.

Основными отечественными квантовыми магнитометрами являются приборы следующих марок: наземные (пешеходные) М-33 и ММП-303, морской КМ-8, аэромагнитометр КАМ-28.



Рисунок 6 Квантовый магнитометр

1.7 Применение магнитной разведки

Магнитная разведка изучает магнитные аномалии, создаваемые геологическими телами, намагниченными современным (индуцированная намагниченность) и древним (остаточная намагниченность) магнитными полями Земли. Намагниченность горных пород определяется наличием в них ферромагнитных минералов (магнетит, пирротин). Особенно интенсивные магнитные аномалии создают изверженные породы основного и ультраосновного составов, магнетитовые железные руды и др.

Измерения при магнитной разведке производятся на поверхности Земли, с самолётов или вертолётов (аэромагнитная съёмка), с движущихся судов (гидромагнитная съёмка или морская магнитная разведка), в горных выработках (подземная магнитная разведка), в буровых скважинах (скважинная магнитная разведка). Для измерений применяются различные магнитометры. Чаще всего измеряются относительные значения вертикальной составляющей напряжённости магнитного поля Земли (наземные съёмки), реже — горизонтальной составляющей, а при аэромагнитных и гидромагнитных съёмках — модуль вектора полной напряжённости геомагнитного поля или его изменение.

В результате интерпретации данных магнитной разведки определяют глубину и другие элементы залегания намагниченных тел в земной коре, которые служат источниками аномального магнитного поля.

При разведке железных руд магнитная разведка в сочетании с измерениями магнитной восприимчивости пород в горных выработках и буровых скважинах позволяет уточнять положение железорудных тел, а также оценивать процентное содержание магнитного железа в рудах.

2 Практическая часть

Цель: исследование свойств диамагнетиков, парамагнетиков и ферромагнетиков с помощью датчиков цифровой лаборатории «Releon»

Основными характеристиками воздействия магнитного поля на геологические тела являются магнитная восприимчивость и намагниченность горных пород. Первая характеризует способность тел намагничиваться под действием внешнего магнитного поля, а вторая – определяет величину и направления намагничивания.

Исследование образцов горных пород на магнитную восприимчивость

Цель: определить горные породы, которые способны намагничиваться под действием магнитного поля

Материалы: образцы минералов и горных пород, постоянный магнит, датчик магнитного поля цифровой лаборатории «Releon».

Порядок выполнения работы:

1. Подготовил образцы горных пород и минералов: кальцит, базальт, магнетит, гематит, перит, сидерит, магнезит, глина, каменный уголь, песчаник, алунит, полевошпат.
2. Все образцы на сутки поместил в магнитное поле постоянного магнита.
3. Подключил датчик магнитного поля к ноутбуку.
4. Запустил программу измерений цифровой лаборатории «Releon».
5. Установил датчик магнитного поля на расстоянии нескольких сантиметров от каждого образца.
6. Определил индукцию магнитного поля каждого образца, данные занес в Таблицу 1.
7. На основании данных таблицы распределил образцы горных пород по магнитной восприимчивости на три группы (Таблица 2)

Таблица 1. Результаты замеров магнитной индукции горных пород

Название образца	Магнитная индукция образца до помещения в магнитное поле постоянного магнита, мТл	Магнитная индукция образца после помещения в магнитное поле постоянного магнита, мТл
Кальцит (CaCO_3)	7,4	7,4
Базальт	4,1	5,11
Магнетит (Fe_3O_4)	7,4	17,4
Гематит (Fe_2O_3)	7,4	10,4
Пирит (FeS_2)	7,4	8,84
Магнезит (MgCO_3)	7,6	7,6
Сидерит (FeCO_3)	5,2	7,12
Глина	8,9	8,9
Каменный уголь	6,4	6,4
Алунит (KAl_3)	5,6	5,6
Песчаник	9,4	9,4
Полевой шпат (лабрадор) $\text{Na}[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$	8,7	8,7

Таблица 2. Распределение исследуемых образцов по магнитной восприимчивости

Группа	Порода
Диамагнетики	кварц, полевой шпат
Парамагнетики	песчаник, глина
Ферромагнетики	магнетит, магнезит и др

Вывод: из данного исследования следует:

- магнитная восприимчивость большинства горных пород определяется присутствием и процентным составом ферромагнитных минералов;

- магнитная восприимчивость возрастает с увеличением внешнего магнитного поля.

Полученные результаты исследования магнитной восприимчивости горных пород имеют большое значение в геологии и палеомагнетизме².

² Палеомагнетизм – область геофизики, изучающая земной магнетизм прошлых геологических эпох. Базируется на исследовании естественной остаточной намагниченности горных пород

Заключение

В данной работе я изучил геофизические методы поиска полезных ископаемых, подробно рассмотрел метод магниторазведки и систематизировал магнитные свойства полезных ископаемых с помощью датчиков цифровой лаборатории «RELEON».

В практической части работы исследовал остаточную намагниченность разных образцов горных пород.

Изучая их магнитные свойства можно судить об их условиях создания, переустройства и также о магнитной природе аномалий Земли. Остаточная намагниченность определяет направление и напряжённость магнитного тела во время возникновения породы.

На магнитных свойствах основана магниторазведка и с ее помощью решается большое количество геофизических задач.

Список используемых источников

1. Геофизические методы поисков и разведки месторождений полезных ископаемых :учебное пособие / А.Г. Соколов, Н. В. Черных; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург : ОГУ, 2015.- 143 с
2. Магнитные свойства [Электронный ресурс] / Магнитные свойства. – Режим доступа: <http://www.mining-enc.ru/m/magnitnye-svoystva>.
3. Величина магнитного поля Земли [Электронный ресурс]. – <http://www.urbiterm.by/?id=velichina-magnitnogo-polya-zemli>
4. Исследование магнитной восприимчивости горных пород [Электронный ресурс] - Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-magnitnoy-voSPIimchivosti-gornyh-porod>
5. Аэромагниторазведка на базе беспилотных летательных аппаратов при прогнозировании золоторудных месторождений [Электронный ресурс]. – <https://cyberleninka.ru/article/n/aeromagnitorazvedka-na-baze-bespilotnyh-letatelnyh-apparatov-pri-prognozirovanii-zolotorudnyh-mestorozhdeniy>
6. Сясько А.А., Гриб Н.Н., и др. Проведение детальных аэрогеофизических работ в сложнодислоцированных комплексах Сутамского террейна (Алданский щит) при изучении железорудных месторождений. *Геодинамика и тектонофизика*. 2020;11(1):141-150. <https://doi.org/10.5800/GT-2020-11-1-0468>