Записки Ленинградского орденов Ленина и Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова, т. LII, вып. 2, 1967 г.

УДК 548. 0 : 538 + 378. 962. 2

МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА МИНЕРАЛОВ

(новая экспозиция в Горном музее)

Д. П. Григорьев, В. Г. Кузнецова

Экспозиция *Магнитность* в Горном музее входит в раздел *Свойства минералов* отдела *Общая минералогия*. В этом отделе дается понятие о минералах,[1] затем характеризуется конституция минералов, [2] а далее разбираются свойства минералов как функция их конституции. Задача новой экспозиции — сообщение расширенного объема сведений об этом свойстве минералов и его зависимости от особенностей конституции минералов.

Экспозиция выполнена по основному принципу музея, который должен быть *каменной книгой по минералогии*.[3] Она состоит из образцов минералов и пояснительных текстов, схем и других экспонатов, позволяющих ознакомиться с вопросом полностью в музее.

Первая тема экспозиции посвящена причине магнитных свойств минералов и магнитным типам минералов. Соответственно природе магнитности здесь используются данные об электронной структуре атомов, объясняемой в предшествующем разделе *Конституция минералов*. Показано, что все минералы (а не только так называемые магнитные), как и все физические тела, имеют свою магнитную характеристику.

Развитие темы начинается с пояснительного текста, который следует сразу за названием экспозиции.

Магнитность

Магнитные свойства минералов определяются магнитностью составляющих их атомов и расположением и взаимодействием соединяющихся атомов, т. е. *магнитной структурой минералов*. Одни минералы состоят из немагнитных атомов, другие из магнитных. Атомы со спаренными электронами немагнитны, когда магнитные моменты электронов компенсируются $\boxed{\uparrow\downarrow}$. Атомы с неспаренными электронами магнитны, и обладают своими *атомными магнитными моментами* $\boxed{\uparrow}$. Магнитность атомов в общем пропорциональна числу неспаренных электронов, каждый из которых имеет элементарный магнитный заряд в 1 M_B (магнетон Бора = $0{,}927 \cdot 10^{-20}$ *эрг/гаусс*).

---

[1] Д. П. Григорьев. Что такое минерал? ЗВМО, ч. 90, вып. 4, 1961, стр. 431—437. D. P. Grigor'yev. What is a mineral? Aspect of theoretical mineralogy in the U. S. S. R., A collection of papers. Pergamon Press, 1964, p. 68—75.

[2] Д. П. Григорьев. Основы конституции минералов. Изд. 2. М., Недра, 1966. D. P. Grigor'yev. Fundamentals of the constitution of minerals. Published by the Israel Program for Scientific Translations, Jerusalem, 1964, p. 1—50.

[3] Д. П. Григорьев и В. Г. Кузнецова. Новая экспозиция минералов в Горном музее. ЗВМО, ч. 87, вып. 1, 1958, стр. 69—75.

Магнитная структура минералов либо такова, что в минерале атомные магнитные моменты компенсируются, либо такова, что компенсации не достигается. По магнитной структуре и вытекающим из нее свойствам минералы делятся на диамагнитные, парамагнитные, ферромагнитные и антиферромагнитные.

Далее представлены минералы различных магнитных типов с характеристикой этих типов и пояснительными текстами и схемами. Модели выполнены в виде плоскостей, на которых прикреплены полушария с нарисованными стрелками.

Диамагнитные минералы

(рис. 1)

Состоят из немагнитных атомов. В магнитном поле H расталкивают силовые линии, воспринимая очень слабую обратную намагниченность I. Магнитная восприимчивость $\varkappa = I/H$ отрицательна и крайне мала.

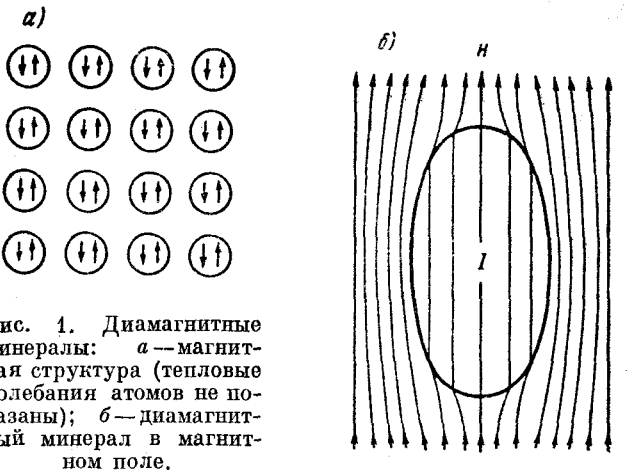
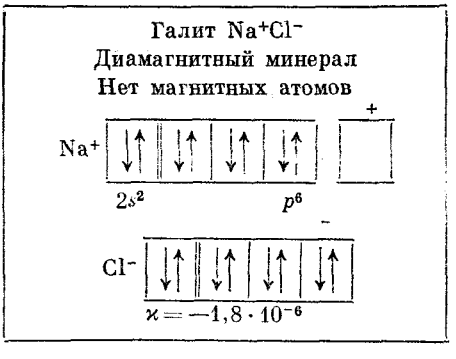
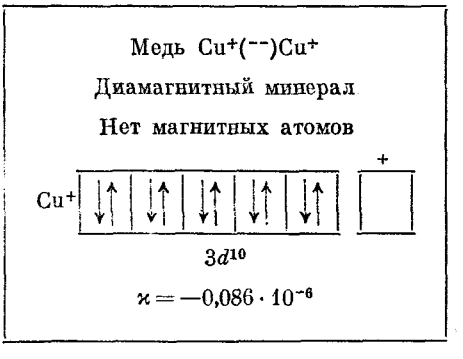


Рис. 1. Диамагнитные минералы: *а* — магнитная структура (тепловые колебания атомов не показаны); *б* — диамагнитный минерал в магнитном поле.

В качестве примеров диамагнитных минералов выставлены галит, и самородная медь. На этикетках (здесь и у образцов других типов) указаны состав минералов, преобладающие межатомные связи и электронная структура атомов (магнитные атомы выделены в экспозиции цветом) а также абсолютная величина магнитной восприимчивости.





Парамагнитные минералы

(рис. 2)

Содержат магнитные атомы как основную составную часть или как примесь. Магнитные оси атомов ориентированы хаотически из-за отсутствия ориентирующих связей при сильных тепловых колебаниях. В магнитном поле H незначительная часть

атомов устанавливается магнитными осями параллельно, почему минералы несколько втягивают силовые линии, получают небольшую намагниченность I. Магнитная восприимчивость $\varkappa = I/H$ положительна, но очень мала.

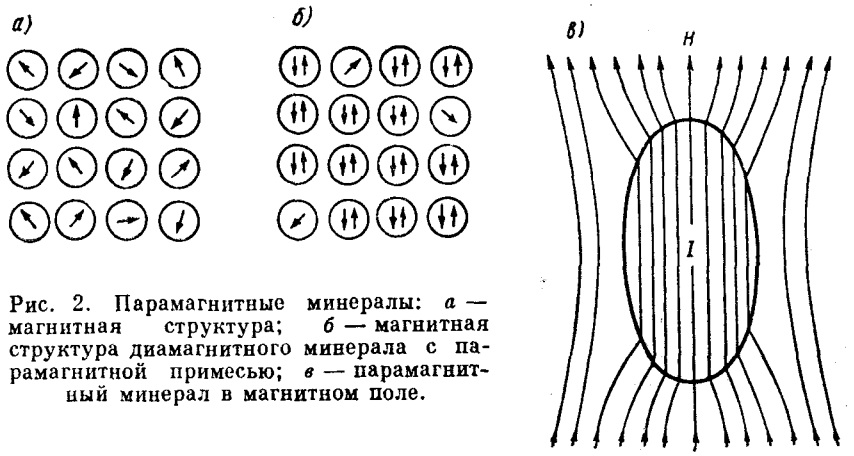


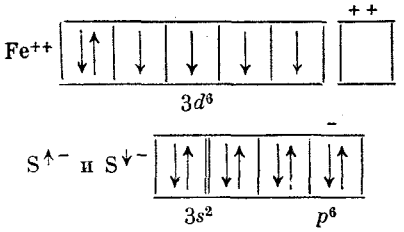
Рис. 2. Парамагнитные минералы: *а* — магнитная структура; *б* — магнитная структура диамагнитного минерала с парамагнитной примесью; *в* — парамагнитный минерал в магнитном поле.

Примерами одного случая парамагнитных минералов служат пирит, другого — сфалерит с изоморфной примесью железа. [1]

Пирит $Fe^{++}[S^{\downarrow -}S^{\uparrow -}]^{--}$

Парамагнитный минерал

Магнитные атомы Fe^{++}

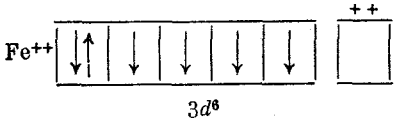


$\varkappa = 0{,}21 \cdot 10^{-6}$

Сфалерит $(Zn_{1-x}Fe_x)S$

При $x = 0$ формула $Zn^{\downarrow\downarrow}S^{\uparrow\uparrow}$, минерал диамагнитен, $x = -0{,}17 \cdot 10^{-6}$.

С примесью магнитных атомов



минерал приобретает парамагнетизм,

$\varkappa =$ до $25 \cdot 10^{-6}$

Ферромагнитные минералы

(рис. 3)

Содержат магнитные атомы как основную составную часть или примесь. Такие атомы вследствие обменного взаимодействия ориентируются магнитными осями параллельно, и их магнитные моменты складываются. В магнитном поле H намагниченность I сильная, магнитная восприимчивость $\varkappa = I/H$ положительна и очень велика. Минералы обладают спонтанной намагниченностью I_s, имеют свой *магнитный момент структуры*, создают вокруг себя магнитное поле.

---

[1] В пирите и сфалерите указаны магнитные ионы железа, хотя атомы этого элемента образуют гибридизированные d^2sp^3-связи (а атомы серы — sp^3-связи).

В качестве представителя ферромагнетизма в экспозиции представлен камасит — самородное железо, встречающееся в метеоритах (с изоморфной примесью никеля).

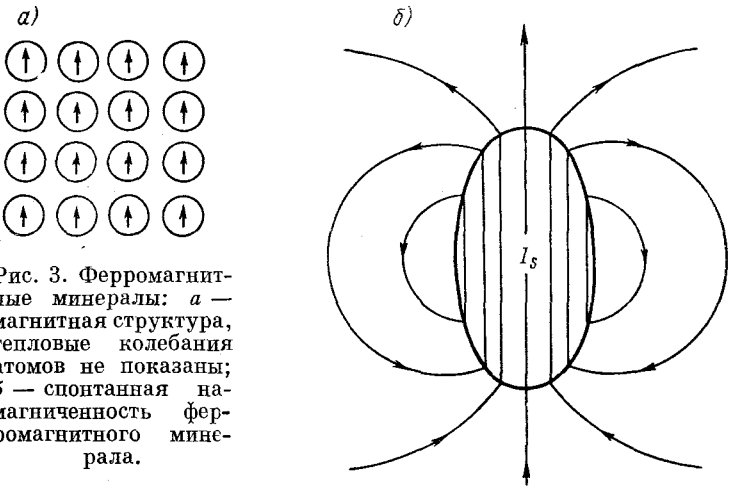


Рис. 3. Ферромагнитные минералы: *а* — магнитная структура, тепловые колебания атомов не показаны; *б* — спонтанная намагниченность ферромагнитного минерала.

Антиферромагнитные минералы

(рис. 4)

Содержат магнитные атомы как основную составную часть или примесь. Такие атомы вследствие обменного взаимодействия ориентируются магнитными осями антипараллельно.

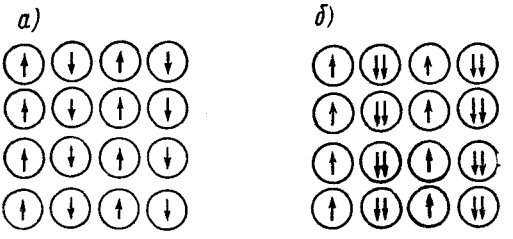
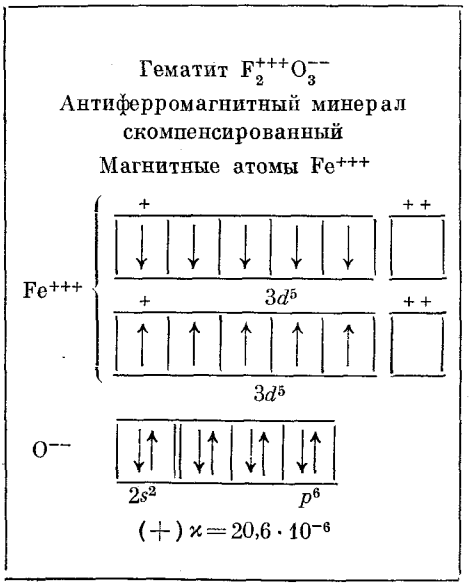


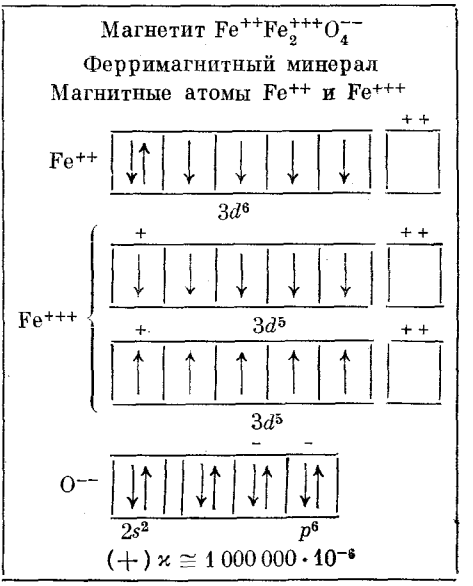
Рис. 4. Антиферромагнитные минералы: *а* — магнитная структура скомпенсированного антиферромагнитного минерала; *б* — магнитная структура ферромагнитного минерала с неравенством магнитных моментов антипараллельно ориентированных атомов.

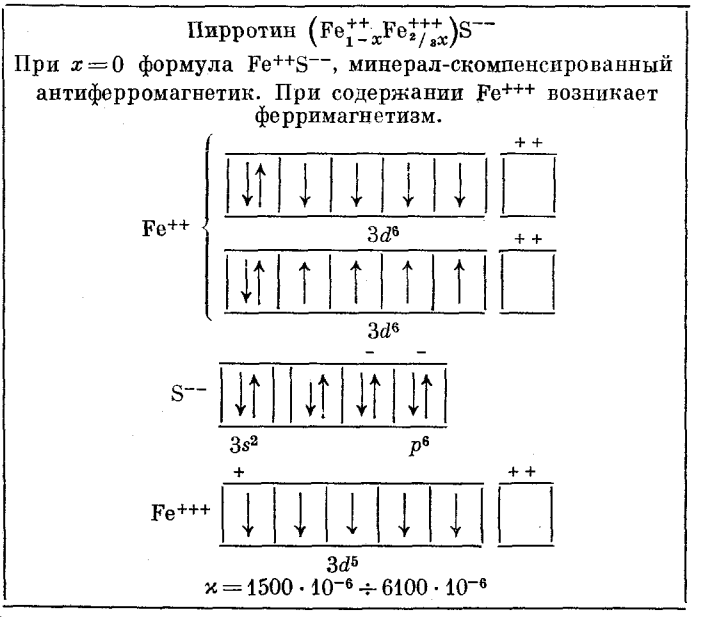
В *скомпенсированных* антиферромагнитных минералах магнитные моменты антипараллельно ориентированных атомов компенсируются. В магнитном поле H минералы немного втягивают силовые линии, получают небольшую намагниченность I. Магнитная восприимчивость $\varkappa = I/H$ положительна, но мала.

В *нескомпенсированных* антиферромагнитных минералах, называемых *ферримагнитными*, магнитные моменты антипараллельно ориентированных атомов не компенсируются вследствие неравенства числа или магнитного момента тех и других атомов. В магнитном поле H намагниченность минералов I сильная, магнитная восприимчивость $\varkappa = I/H$ положительна и может быть значительной. Минералы обладают спонтанной намагниченностью I_s, имеют свой *магнитный момент структуры*, создают вокруг себя магнитное поле.[1]

К числу скомпенсированных антиферромагнитных минералов относится гематит, а к нескомпенсированным антиферромагнитным (ферримагнитным) — магнетит. Пирротин — образец скомпенсированного антиферромагнитного минерала с ферримагнитной примесью.[2]







[1] На рис. 3 и 4 тепловые колебания атомов не показаны.

[2] Магнитная структура атомов железа в гематите, магнетите и пирротине показана условно.

Конкретная магнитная и кристаллическая структуры (а не схемы) показаны на примере манганозита, который имеет простой состав. Кристаллы его относятся к простейшему структурному типу галита, магнитная структура хорошо изучена нейтронографически. Манганозит — скомпенсированный антиферромагнетик.

Экспонат представляет собой объемную шариковую модель структуры (рис. 5), в которой на *атомах* марганца обозначены синим и красным

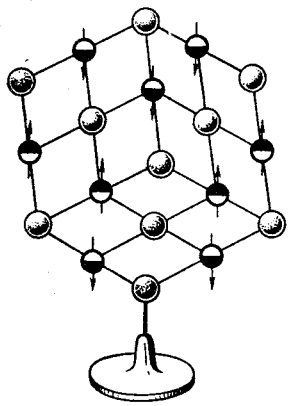


Рис. 5. Магнитная и кристаллическая структуры манганозита. Расположение атомов по типу кубического галита, но ориентировка магнитных осей атомов отвечает ромбоэдрической структуре.

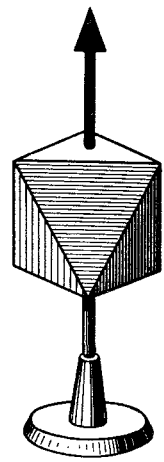
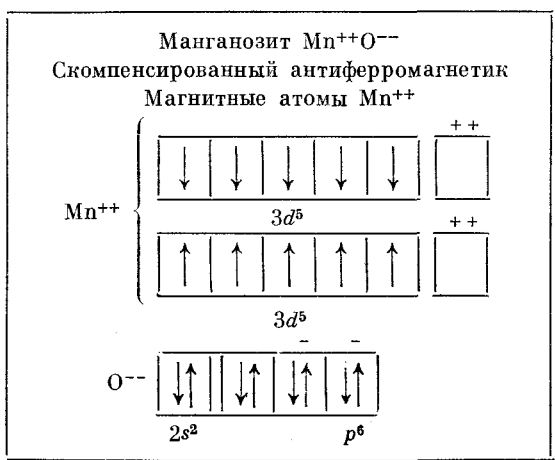


Рис. 6. Магнитная ось структуры. В магнетите это направление [111].

цветом и прикрепленными стрелками магнитные оси (ниже показаны только внешние части модели). Этикетка содержит необходимые сведения об атомах марганца и кислорода.



Анизотропия магнитной структуры означает, что в кристаллической структуре имеется магнитная ось (ось наибольшего намагничивания).

Магнитная ось показана на примере модели кристалла магнетита (рис. 6).[1]

Вторая тема экспозиции посвящена доменной магнитной структуре кристаллов (и зерен) ферромагнитных и ферримагнитных минералов, привлекающих наибольшее внимание в минералогической науке. Здесь показана зависимость проявления магнитных свойств минералов не только от магнитной конституции, но и от доменной структуры. Сначала сообщаются общие понятия (текст).

Доменная структура минералов

(рис. 7)

Кристаллы ферромагнитных и ферримагнитных минералов самопроизвольно делятся (при сохранении монокристаллической структуры) на отдельные магнитные участки — домены размером от 10^{-5} до 10^{-3} *см*, каждый из которых имеет однородную магнитную структуру. Домены ориентируются магнитными осями антипараллельно и распределяются так, что их магнитные поля замыкаются внутри кристалла (что энергетически выгодно). При отсутствии наложенного поля магнитные моменты доменов компенсируются, и кристалл как целое внешне не проявляет своей магнитности. При наложении магнитного поля доменная структура изменяется, сначала

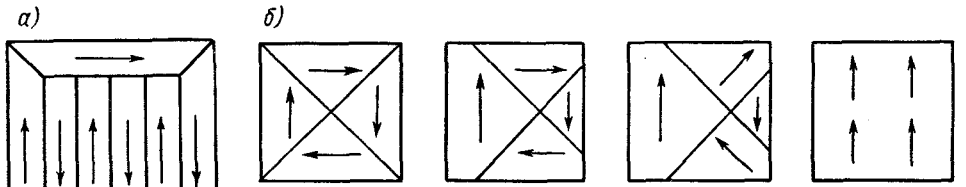


Рис. 7. Доменная структура минералов: *а* — скомпенсированная доменная структура; внутренние и окаймляющие домены ориентированы антипараллельно; *б* — изменение простейшей доменной структуры кристаллов под влиянием внешнего магнитного поля.

за счет роста одних доменов за счет других, затем за счет поворота магнитных осей доменов. Таким образом, доменная структура декомпенсируется и возникает *магнитный момент кристалла*. Изменение может быть обратимое и необратимое; в последнем случае получается кристалл-магнит. В кристаллах минералов из-за магнитного поля Земли доменная структура всегда несколько декомпенсирована. Сильные магниты образуются под влиянием добавочных магнитных полей (в частности, при ударе молнии).

Этот тезис иллюстрируется схемами (см. рис. 7) и фотографиями доменной структуры кристалла вне магнитного поля и в магнитном поле (простейший случай).

Третья тема экспозиции посвящена магнитным структурам поликристаллических агрегатов из ферромагнитных и ферримагнитных минералов. Эти структуры в свою очередь влияют на наблюдаемые свойства минералов. И здесь первым экспонатом служит пояснительный текст.

Магнитная структура минеральных агрегатов

Минеральные агрегаты, состоящие из кристаллов ферромагнитных и ферримагнитных минералов, имеют различную структуру. Предопределенные структурой различные магнитные свойства агрегатов зависят от ориентировки и силы составляющих магнитных кристаллов. Различаются агрегаты со скомпенсированной и нескомпенсированной магнитными структурами.

---

[1] Все минералы, в том числе и кубические, могут иметь только одну магнитную ось.

Магнитно скомпенсированные агрегаты

(рис. 8)

Составляющие агрегат кристаллы ориентированы магнитными осями хаотически, поэтому магнитные моменты взаимно компенсируются и агрегат, не имея своего магнитного момента, не создает вокруг себя магнитного поля. Агрегат не магнитен.

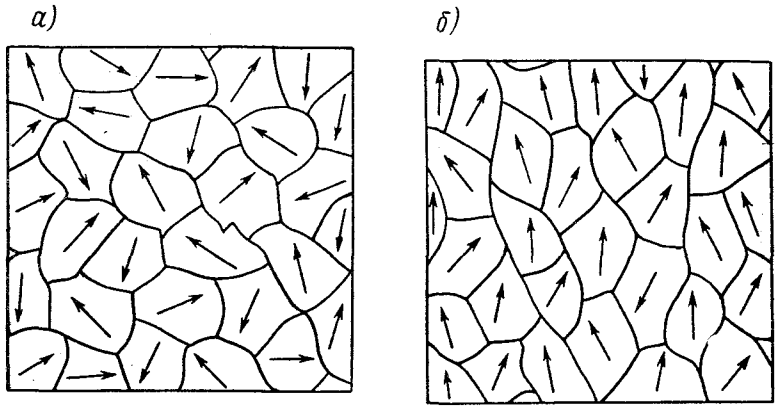


Рис. 8. Магнитная структура агрегатов: *а* — скомпенсированная; *б* — нескомпенсированная.

Магнитно нескомпенсированные агрегаты

Природные магниты

(рис. 9)

Составляющие агрегат кристаллы ориентированы магнитными осями преимущественно в одну сторону (см. рис. 8, *б*). Компенсации магнитных моментов зерен не получается. Создается *магнитный момент агрегата*, который имеет свое магнитное поле. Как и отдельные кристаллы с нескомпенсированной доменной структурой, такие агрегаты — природные магниты.

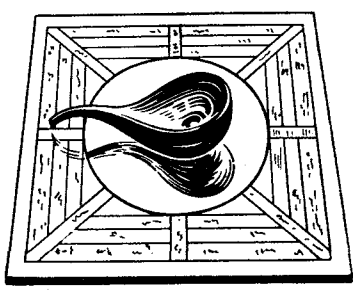


Рис. 9. Природный магнит, употребленный в компасе периода Первой Ханьской династии в Китае (206 г. до н. э. — 25 г. н. э). Стрелка вырезана из магнетита в виде ложки, прикасающейся к медной пластинке лишь в одной точке.

Легенда о природных магнитах иллюстрирована старинной гравюрой, изображающей плывущий возле магнитных скал корабль, из которого скалы вытягивают гвозди. Показано первое практическое использование природного магнита в древнейшем китайском компасе (см. рис. 9).

Четвертая тема посвящена различным видам использования магнитных свойств минералов (здесь не говорится о магнетохимии, которая относится к области конституции минералов).

Использование магнитных свойств минералов
Диагностика минералов

Некоторые внешне сходные минералы можно различать путем испытания с магнитной стрелкой или посредством измерения магнитной восприимчивости.

Это показано на образце магнетита, к которому притянулась магнитная стрелка, тогда как образец хромита ($\varkappa = 53{,}10^{-6} \div 125{,}10^{-6}$) заметно не взаимодействует со стрелкой.

Определение содержания химических примесей в минералах

(рис. 10)

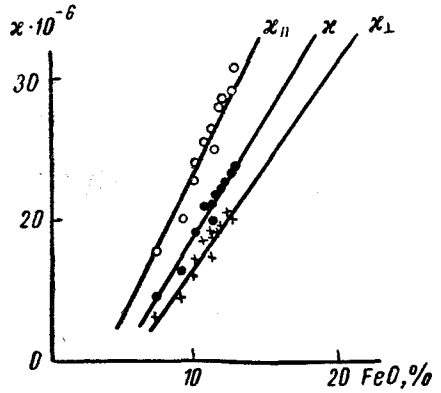
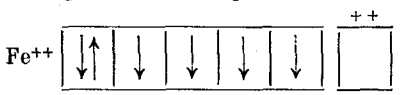


Рис. 10. Зависимость магнитной восприимчивости массы в 1 *г* анкерита от содержания FeO.
$\varkappa_{\parallel}$ — измерение параллельно оси [0001]; $\varkappa_{\perp}$ — измерение перпендикулярно оси [0001]; $\varkappa$ — средняя восприимчивость, определяемая в порошке.

Химические примеси элементов, придающих минералам парамагнитность, определяются величиной магнитной восприимчивости минерала.

Анкерит $Ca(Mg_{1-x}Fe_x)[CO_3]_2$
При $x = 0$ формула $CaMg[CO_3]_2$,
минерал диамагнитный
Парамагнитная примесь Fe^{++}



Разделение минералов

(рис. 11)

Минералы по магнитной восприимчивости разделяются при помощи магнитов и электромагнитов в лабораториях (для исследования) и на обогатительных фабриках (в промышленности).

Железная руда с магнетитом и роговой обманкой. Первоуральское месторождение, Средний Урал

↓ ↓

Магнетит $FeFe_2O_4$
$\varkappa \cong 1\,000\,000 \cdot 10^{-6}$
Собирается в магнитном концентрате и направляется для выплавки металла

Роговая обманка
$Ca_2(Mg_{1-x}Fe_x)_5(OH)_2 \mid Si_4O_{11} \mid_2$
$\varkappa \cong 50 \cdot 10^{-6}$
Попадает в немагнитную фракцию и направляется в отвал как пустая порода

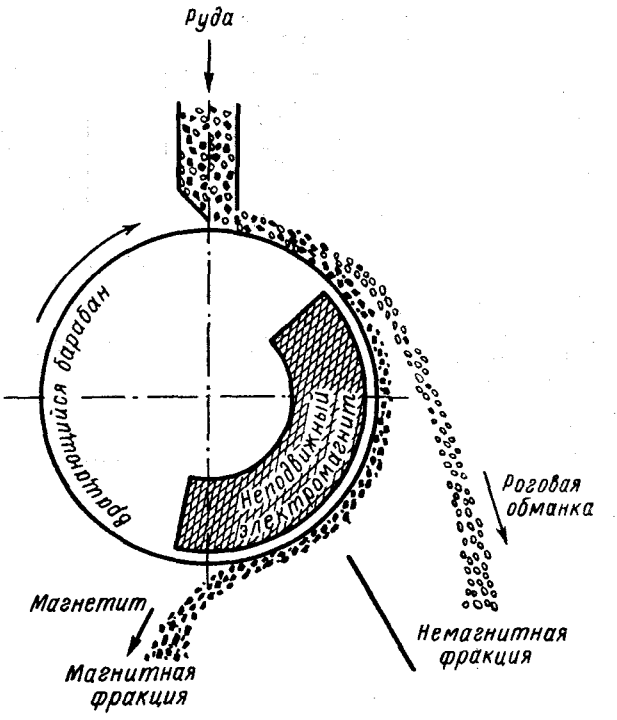


Рис. 11. Магнитная сепарация железной руды — магнетита, вкрапленного в роговообманковую породу. Схема промышленной установки на обогатительной фабрике.

Поиски минералов

(рис. 12)

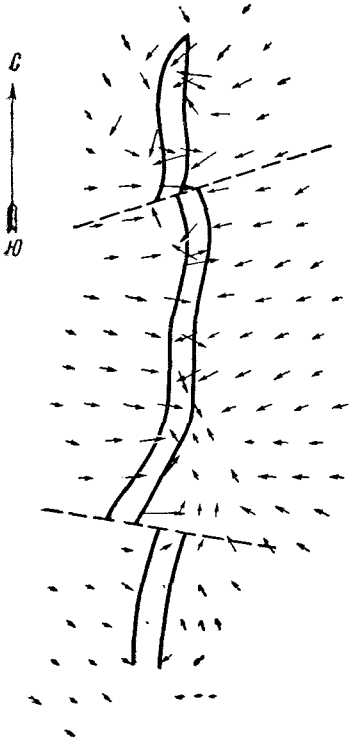


Рис. 12. Магнитометрический план железорудного магнетитового месторождения на Северном руднике Урала. Показаны векторы аномальной горизонтальной составляющей магнитного поля H_a и контур рудного тела.

Месторождения магнетитовых руд обнаруживаются при магнитометрической съемке наземной или с самолета.

Магнетитовая железная руда месторождений Курской магнитной аномалии, обнаруженных при наземной съемке под слоем осадочных пород мощностью 100—550 *м*

Магнетитовая железная руда Кустанайских месторождений, обнаруженных с воздуха под слоем осадочных пород мощностью 40—120 *м*

В целом экспозиция дает представление о различных проявлениях магнитных свойств минералов. Эти свойства так или иначе отображают конституционные особенности объектов разного масштаба — атомов, кристаллов, агрегатов. Магнитность минералов находит разнообразное применение в науке и технике.