

Физика горных пород

Лекция 10 – Электромагнитные и
радиационные свойства горных пород

Лектор: Шульгин Павел Николаевич

<http://do.dstu.education>

<http://sggs-donstu.ucoz.ru/>

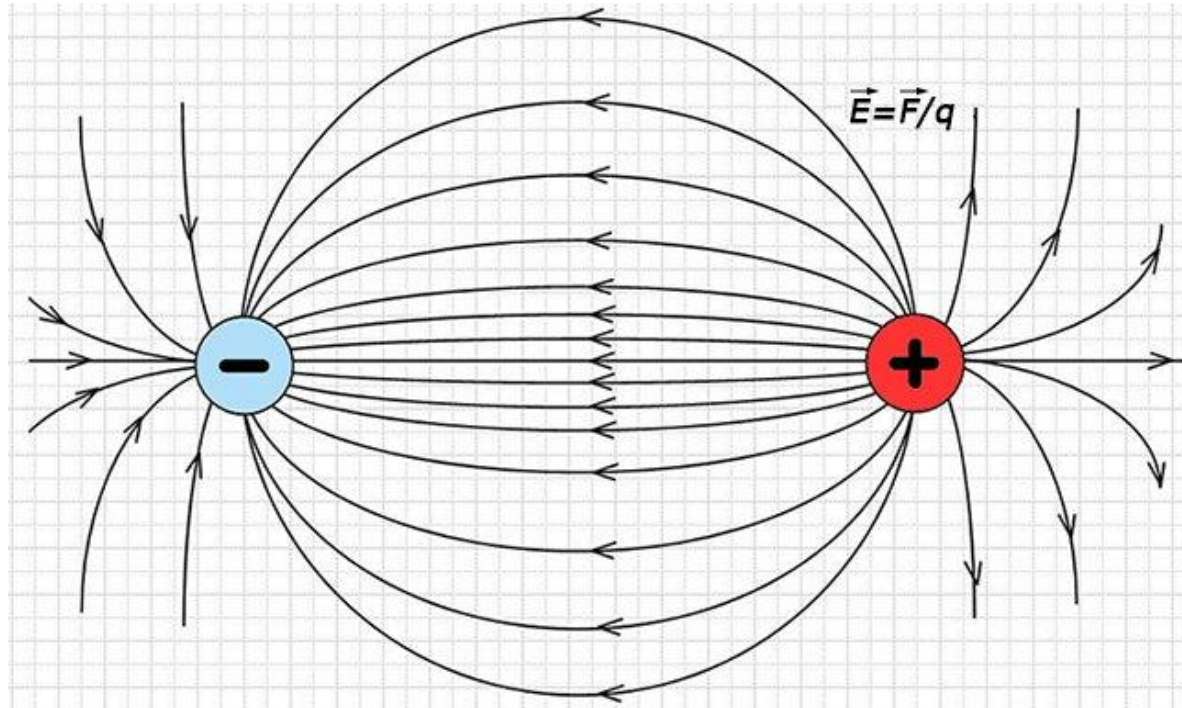
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД

- Электрическое поле проявляется в силовом воздействии на заряженные частицы и тела.
- Величина и направление действия электрических сил в любой точке пространства определяется напряженностью электрического поля E .

Напряженность электрического поля

- это векторная величина, равная отношению силы, с которой поле действует на заряд к величине этого заряда:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$$



Потенциал φ , электрического поля

- Это работа, которую нужно совершить для переноса единичного заряда из точки, где силы действия равны нулю (бесконечность), в данную точку.
- Разность потенциалов между двумя точками поля **A** и **B** называется напряжением **U**:

$$U = \varphi_A - \varphi_B$$

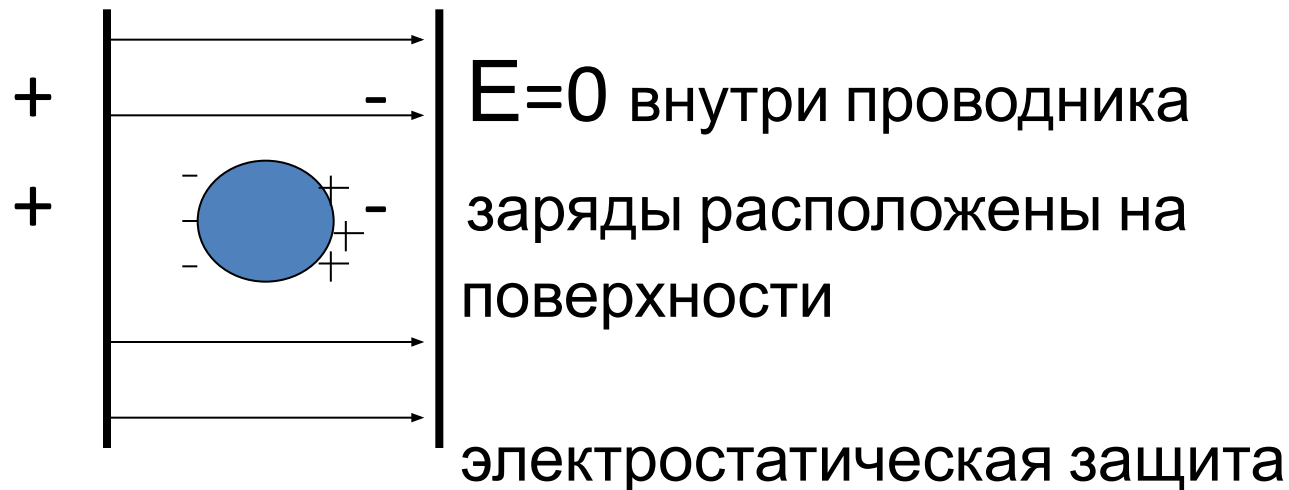
- Все тела по электрическим свойствам в идеальном случае могут быть разделены на две группы - проводники и диэлектрики.
- **Диэлектрики** характеризуются полным отсутствием движения зарядов, а
- **проводники** тем, что электрическое поле вызывает в них движение зарядов.

проводники

вещества, в которых свободные заряды
могут перемещаться по всему объему

металлы, растворы солей, кислот,
влажный воздух, плазма, тело человека

- при отсутствии внешнего электрического поля заряды, сообщенные проводнику, распределяются по его поверхности;
- внешнее электрическое поле → электростатическая индукция – перераспределение зарядов

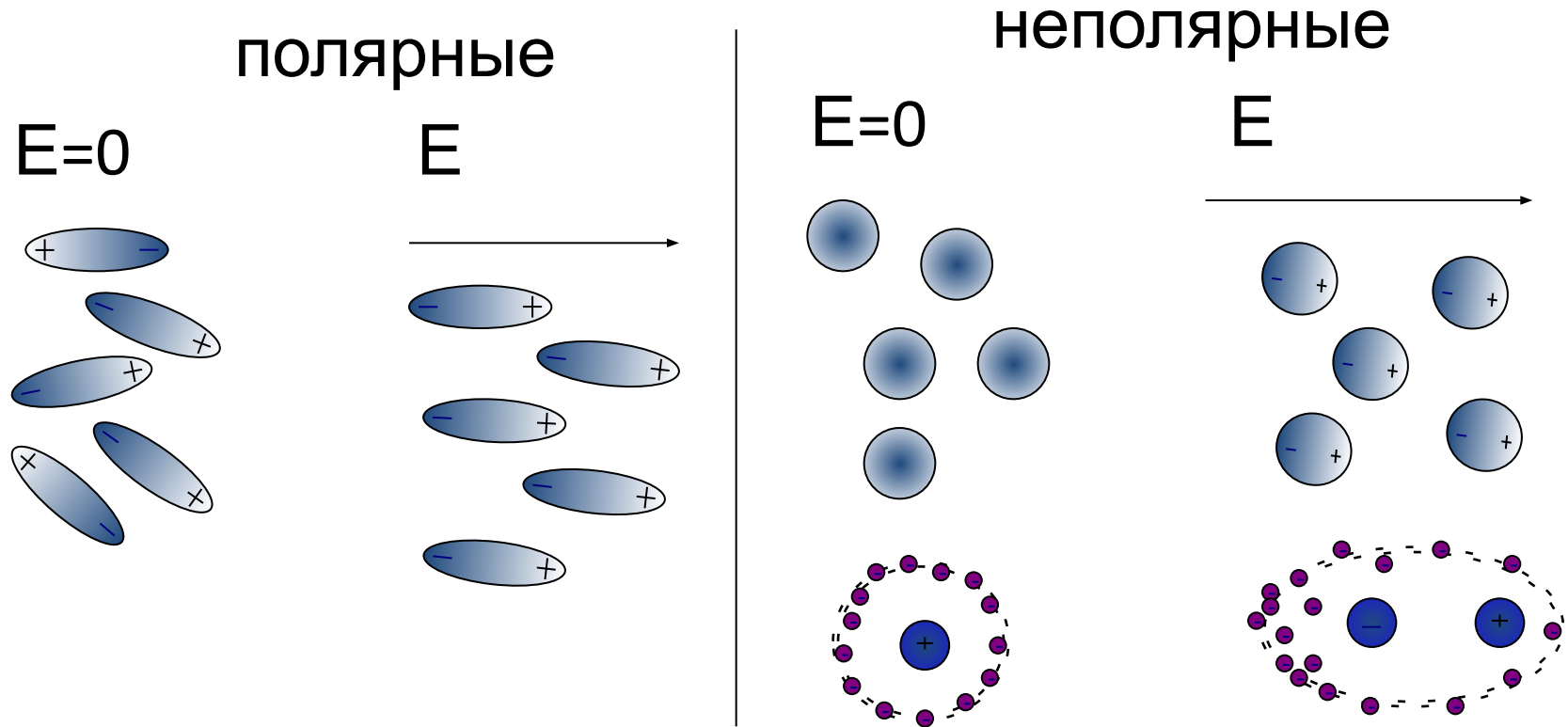


диэлектрики

вещества, содержащие только связанные заряды

газы, дистиллированная вода, бензол, масла, фарфор, стекло, слюда и др.

диэлектрики
поляризация диэлектриков



Электрическое поле внутри диэлектрика ослабевает

Относительная диэлектрическая проницаемость среды

$$\epsilon = E_{\text{вак}} / E$$

полупроводники

вещества, в которых количество свободных зарядов зависит от внешних условий (температура, напряженность, электрическое поле)

минералы, оксиды, сульфиды, теллуриды, германий, кремний, селен и др.

- Перенос зарядов из одной точки проводника в другую, осуществляемый электронами или ионами и носит название **тока проводимости**.

- **Ток** характеризуется количеством элементарных зарядов, проходящих через единицу сечения проводника в единицу времени. Эту величину называют **плотностью электрического тока i** .
- Плотность электрического тока прямо пропорциональна напряжённости поля:

$$i = j \cdot E$$

- - это **закон Ома**. Коэффициент **j** зависит от рода и состояния проводящей породы и называется **удельной электропроводностью**.

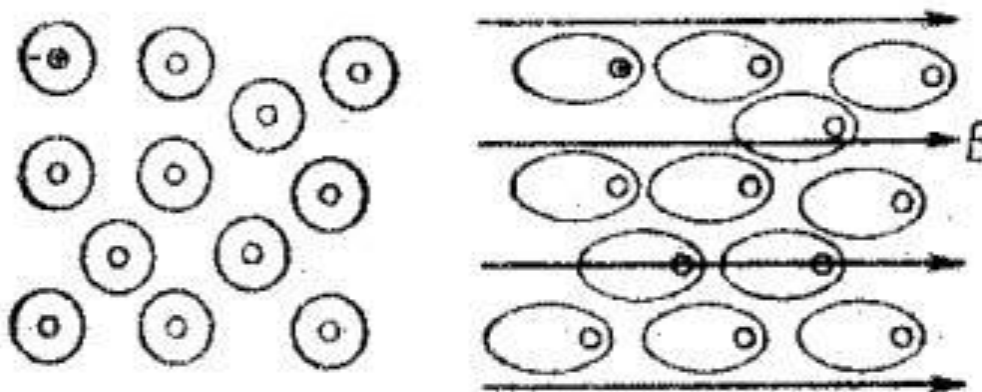
Поляризация пород

- При наложении на породу электрического поля в ней происходит смещение внутренних связанных зарядов таким образом, что в результате на поверхности породы появляются неуравновешенные связанные заряды.
- Эти заряды создают поле противоположно направленные к внешнему и ослабляющее его.

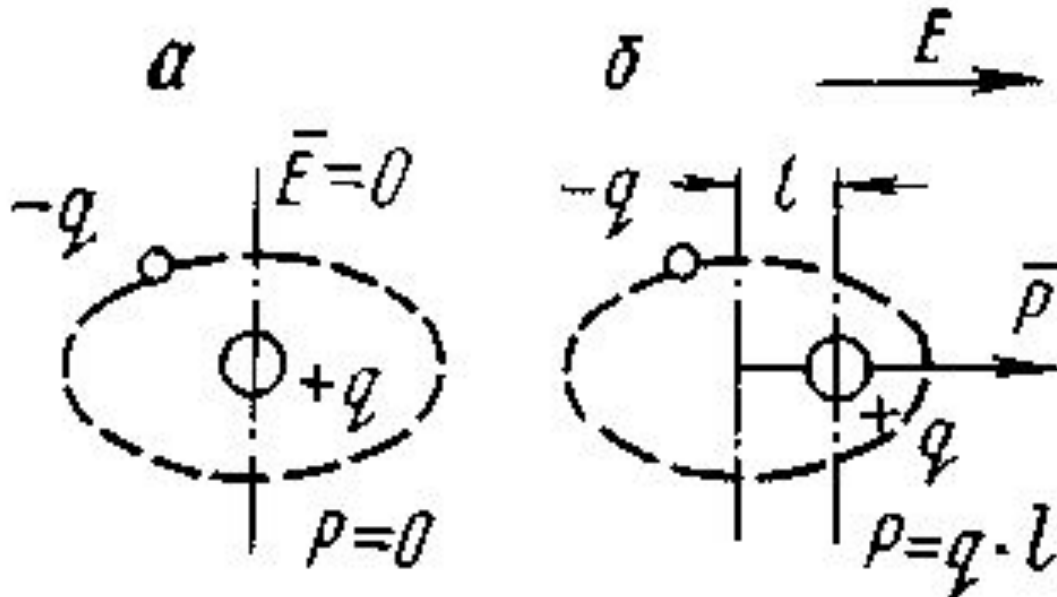
- В зависимости от того, какими частицами вызывается поляризация породы, выделяют несколько видов поляризации:

1. Электронная поляризация

- возникает в атомах при воздействии внешнего поля при смещении электронных орбит и положительно заряженных ядер.

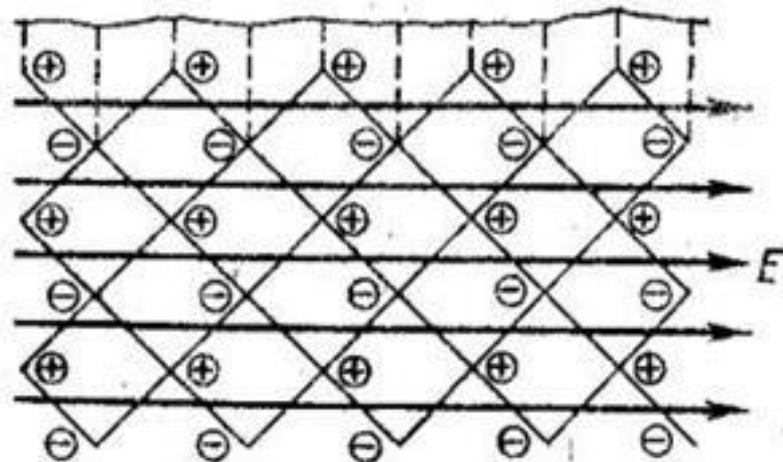
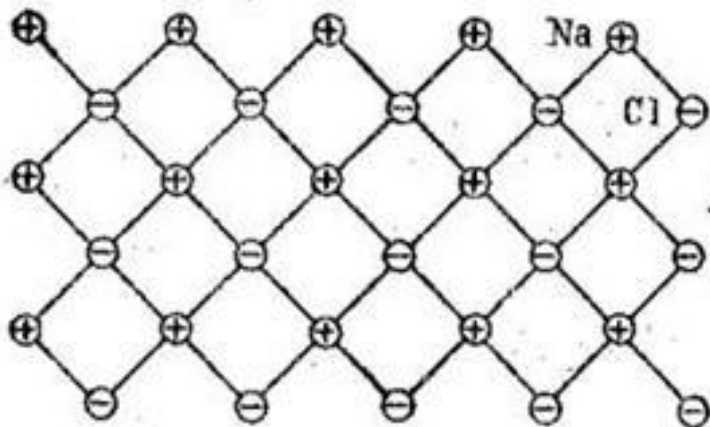


- **Электронная поляризация** присуща всем атомам и молекулам и является наиболее быстрым видом поляризации (возникает за время 10^{-16} - 10^{-14} с.).

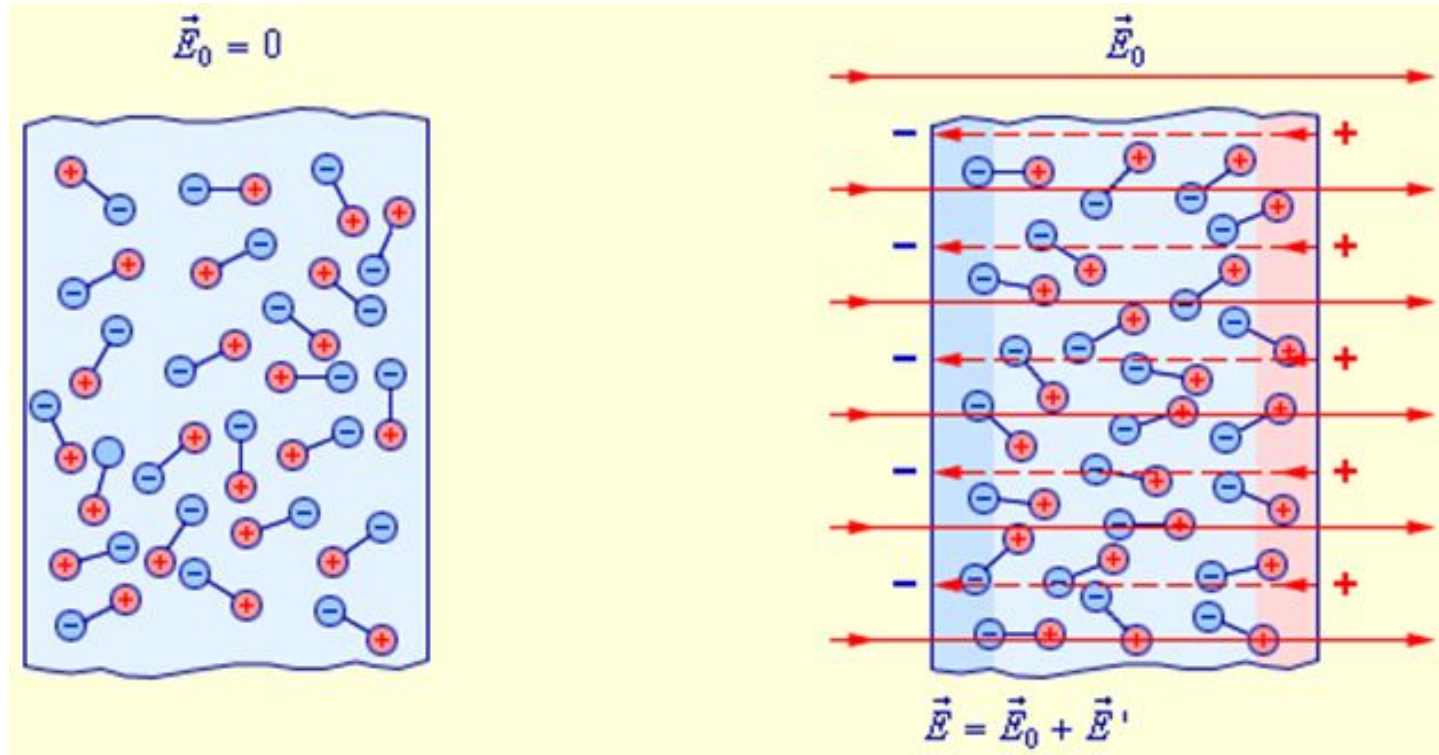


2. Атомная (ионная) поляризация

- Возникает при смещении в электрическом поле ионов или частей кристаллической решётки.
- Скорость установления атомной поляризации несколько меньше, чем электронной и составляет 10^{-14} - 10^{-12} с.



3. Дипольная (ориентационная) поляризация

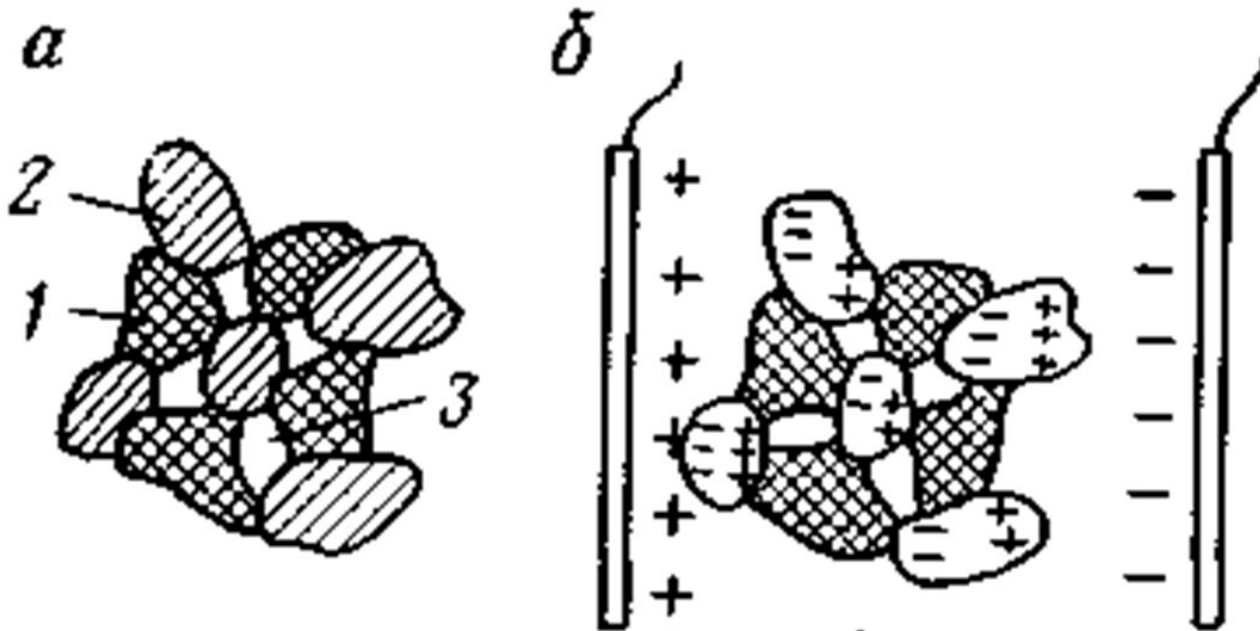


- наблюдается при наличии в породах полярной связи ионов.

- Дипольная ориентационная поляризация зависит от температуры, чем она выше, тем меньше поляризация.
- Дипольная ориентационная поляризация завершается в течении 10^{-10} - 10^{-7} с.

4. Макроструктурная (объемная) поляризация

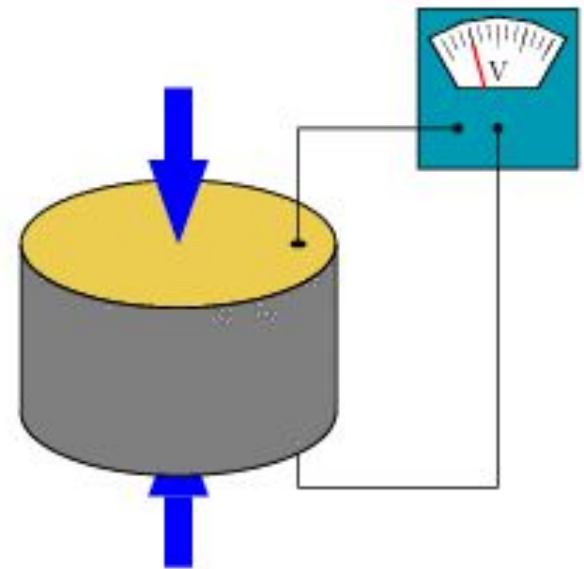
- возникает в многофазной системе, состоящей из кристаллов, обладающих различными свойствами, и пустот, заполненных жидкостью α



- При внесении породы в электрическое поле свободные электроны и ионы, содержащиеся в проводящих и системах, начинают перемещаться в пределах каждого включения.
- В результате каждое включение приобретает дипольный момент и ведет себя подобно большой молекуле.
- Время завершения макроструктурной поляризации составляет 10^{-8} - 10^{-3} с.

Особые случаи поляризации минералов и пород

- Пьезоэлектрический эффект, открыт в 1880г., и заключается в том, что при приложении к кристаллу механической нагрузки он поляризуется (турмалин, сегнетова соль, кварц).
- Этот процесс обратим, т.е. если приложить к кристаллу электрическое поле, то оно вызывает его деформацию.



Диэлектрическая проницаемость

- Напряжённость поля зависит от свойств среды, в которой имеется электрическое поле.
- Влияние среды устанавливается законом Кулона о силе взаимодействия F (двух зарядов q_1 и q_2).

$$F = \frac{q_1 \cdot q_2}{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon_a \cdot r^2}, \text{ Н}$$

- где, F - сила взаимодействия двух зарядов q_1 и q_2 ;
- r - расстояние между зарядами;
- ε_a - коэффициент , учитывающий электрические свойства среды и называемый **абсолютной диэлектрической проницаемостью**.

- Величину ϵ_a можно представить как

$$\epsilon_a = \epsilon \cdot \epsilon_0,$$

где ϵ_0 – коэффициент пропорциональности между силой и взаимодействующими зарядами, расположенными в вакууме.

- Этот коэффициент называется **электрической постоянной вакуума** $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$.

- ϵ — это **относительная диэлектрическая проницаемость** исследуемого вещества.
- Она показывает, во сколько раз уменьшается напряжённость электрического поля в породе по сравнению с вакуумом.

Диэлектрические потери

- Под диэлектрическими потерями понимают величину энергии электрического поля, которая рассеивается (теряется) в единица объёма диэлектрика за 1 сек.

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{I_a}{I_p} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C \cdot R_a}$$

Электропроводность горных пород

может осуществляться:

- с переносом вещества (ионная и ионно-электронная проводимость);
- без переноса вещества (электронная и дырочная проводимости).

- **Повышение** температуры **уменьшает** электропроводность проводников.
- В **диэлектриках** обратное явление, так как с повышением температуры подвижность ионов увеличивается, растет их кинетическая энергия и облегчается отрыв ионов от решетки и поэтому электропроводность диэлектриков **возрастает**.
- В полупроводниках повышение температуры приводит к увеличению концентрации электронов и росту электропроводности.

Есть два характерных отличительных признака полупроводников и проводников:

- электропроводность проводников значительно выше, чем у полупроводников;
- возрастание электропроводности полупроводников с повышением температуры, в то время как у проводников она уменьшается.

Воздействие электрического поля на горные породы

- При воздействии электрического поля на горные породы, в них возникают:
- поляризация;
- возбуждение электронов и ионов;
- изменение механических свойств и
т.д.

Как известно, при малых напряжениях для диэлектрика соблюдается закон Ома:

$$\frac{dU}{dI} = \text{const} = R$$

- При переходе к большим напряжениям закон Ома перестает соблюдаться, и ток начинает быстро расти - сопротивление диэлектрика убывает.
- Напряжение, при котором сопротивление становится равным нулю, называется **пробивным напряжением**, а соответствующая этому напряжению напряженность электрического поля - **пробивной напряженностью**.

- Нарушение диэлектрических свойств породы может быть обусловлено различными факторами, в зависимости от которых выделяют различные формы пробоя:
- **тепловой,**
- **электрический,**
- **химический.**

1. Тепловой пробой

- Ток, проходящий через породу, нагревает ее.
- Так как сопротивление горных пород велико, то при небольших напряжениях количество выделившегося тепла мало.

- Если повысить напряжение, произойдёт сильный разогрев породы. В результате произойдёт повышение температуры породы, что вызовет уменьшение ее сопротивления и увеличение тока, проходящего через породу. Дальнейший разогрев - новое нарастание тока и т.д. В результате ток может возрасти до такой величины, что произойдёт пробой.
- Такой тип пробоя носит название **теплового**.

Отличительные черты теплового пробоя:

- нагрев горных пород;
- относительная длительность процесса;
- зависимость пробивной напряженности от температуры.

2. Электрический пробой

- происходит, когда в горной породе образуются и накапливаются под воздействием электрического поля свободные носители тока (ионы, электроны).
- Когда лавинообразное нарастание носителей тока достигает определенного предела, происходит нарушение свойств диэлектрика, сопротивление породы резко падает.

- При электрическом пробое главным фактором, является **напряженность электрического поля**.
- Электрический пробой в отличие от теплового пробоя происходит практически **мгновенно**.
- Для осуществления электрического пробоя необходимо напряжение в сотни раз больше, чем для теплового ($10^6 - 10^7$ В/см и более).

Магнитные свойства горных пород

- При помещении вещества в магнитное поле, оно намагничивается, т.е. само приобретает магнитные свойства.
- Магнитный момент единицы объема намагниченного тела называется, **намагниченностью**.

- Магнитные свойства вещества характеризуются магнитной **проницаемостью**, которая показывает, во сколько раз внешнее магнитное поле изменяется вследствие намагничивания среды.

$$B = \mu_a \cdot H \qquad \mu = \frac{\mu_a}{\mu_0}$$

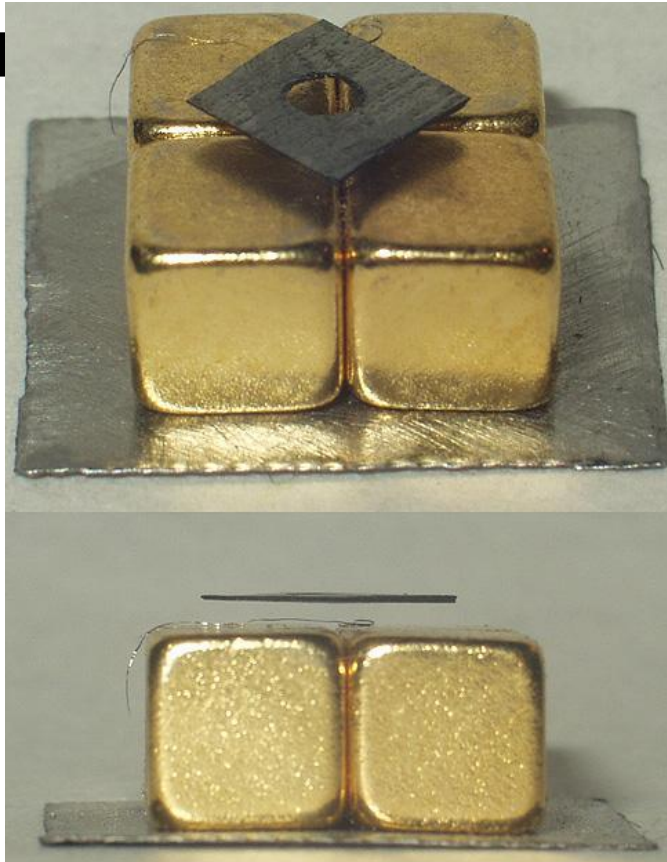
B – магнитная индукция;

H – напряжённость магнитного поля;

$\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м - магнитная постоянная вакуума.

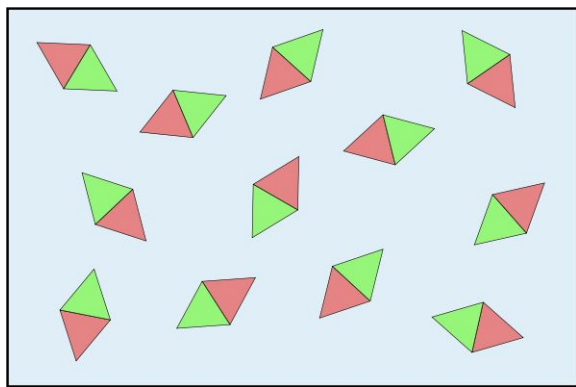
- По значению относительной магнитной проницаемости все вещества делятся на три группы:
- диамагнетики ($\mu < 1$, 0,999836-1,0);
- парамагнетики ($\mu > 1$, 1,0-1,0064);
- ферромагнетики ($\mu \gg 1$, 1,0064-5,0) и меняется в зависимости от напряженности внешнего поля (10^4 - $4 \cdot 10^6$).

- **Диамагнетики** — вещества, намагничивающиеся *против направления* внешнего магнитного поля.
- В отсутствие внешнего магнитного поля диамагнетики — **парамагнетики**.

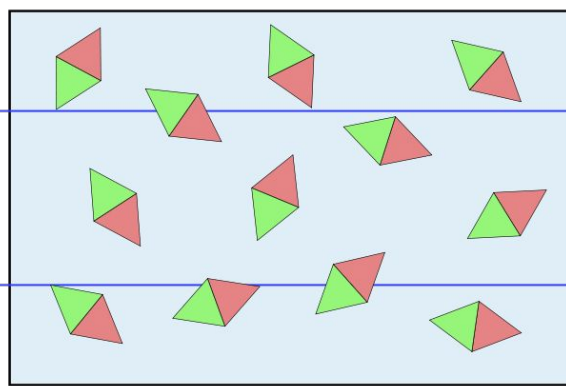


Парящий
пиролитический углерод

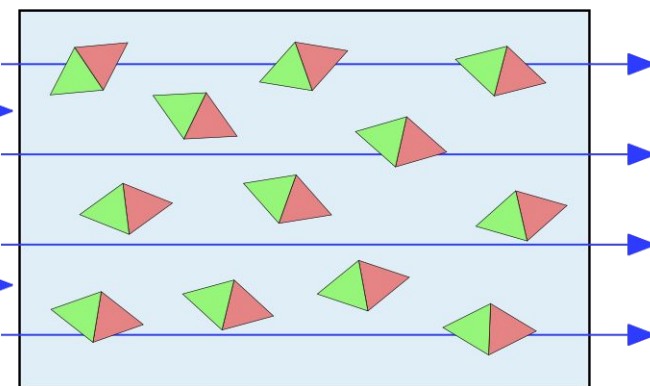
- **Парамагнетики** — вещества, которые намагничиваются во внешнем магнитном поле в *направлении* внешнего магнитного поля ($J \uparrow \uparrow H$) и имеют положительную магнитную восприимчивость



Парамагнетик в отсутствие магнитного поля.

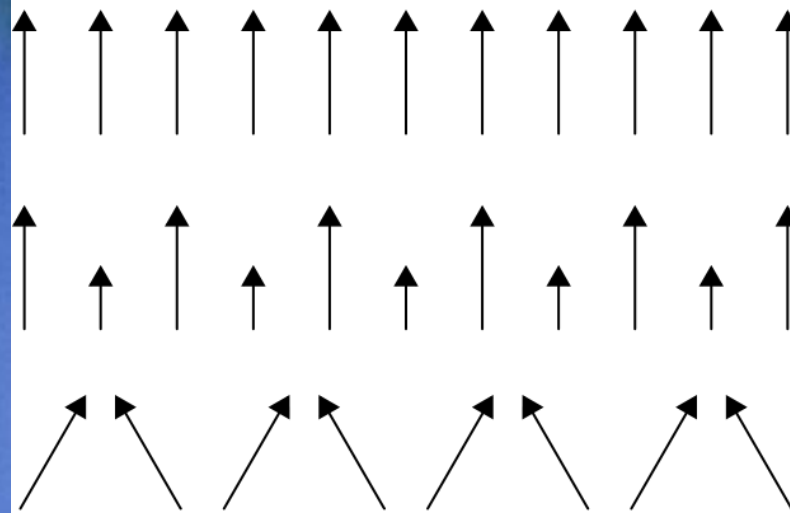


Парамагнетик в присутствии слабого магнитного поля.



Парамагнетик в присутствии сильного магнитного поля.

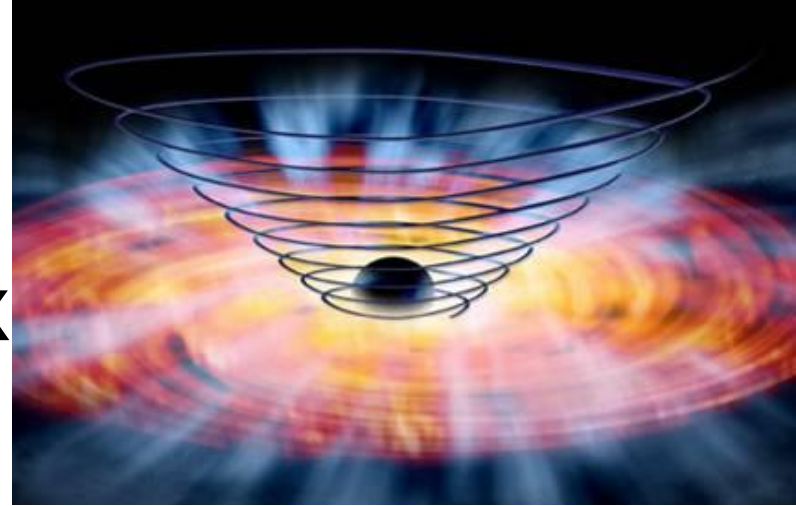
- **Ферромагнэтики** — такое вещество, которое (при температуре ниже точки Кюри) способно обладать намагниченностью в отсутствие внешнего магнитного поля.



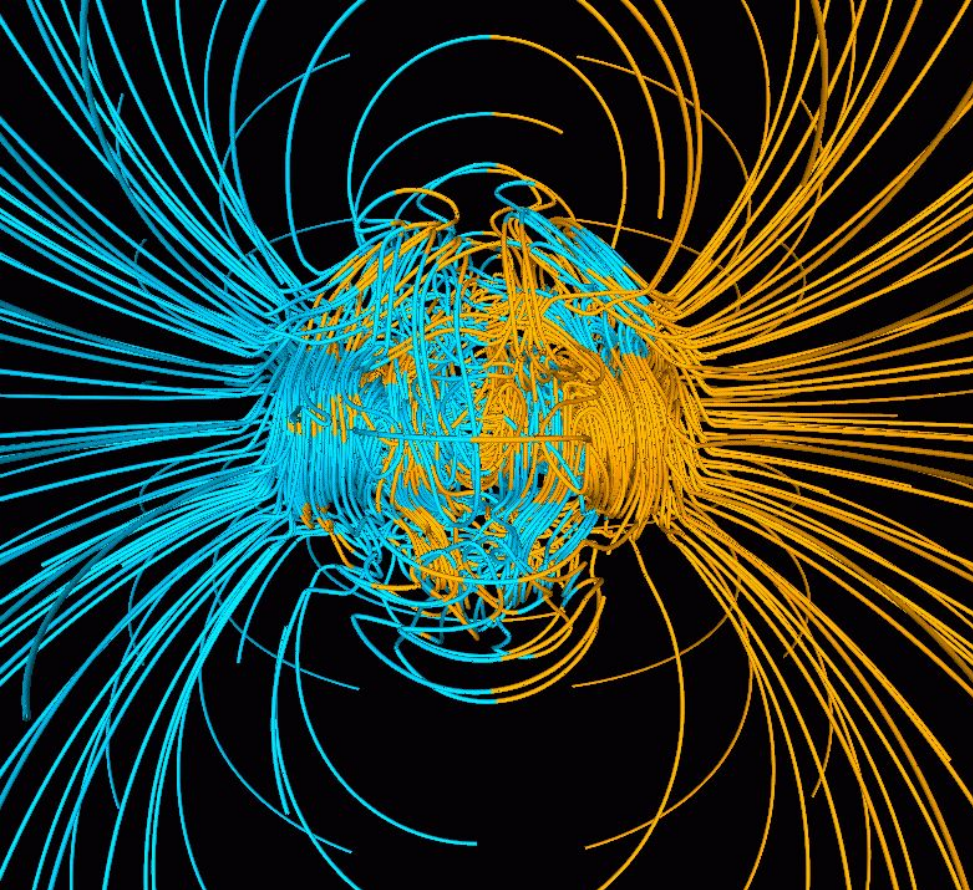
Ферромагнетик -
упорядочивание
магнитных
моментов.

Железные стружки притягиваются к этому подковообразному магниту. Железо — ферромагнетик, следовательно сами стружки превращаются в мини-магниты

Электромагнитное поле в горных породах

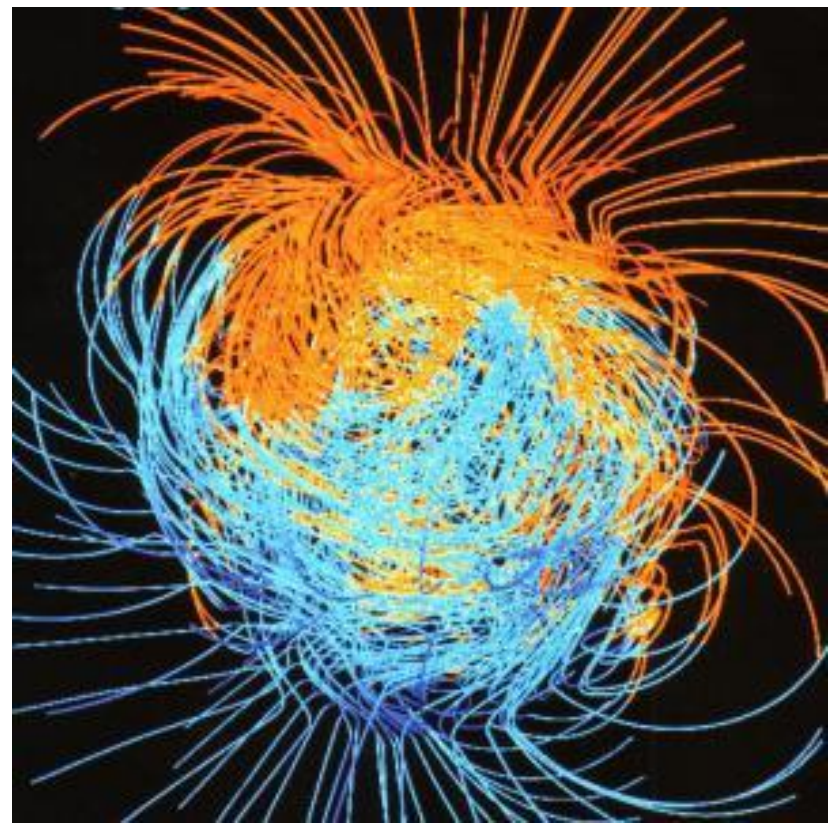


- **Электромагнитное поле** - это особый вид материи, характеризующийся наличием электрического и магнитного полей, связанных непрерывным взаимным превращением.
- Электромагнитное поле, возникшее в некотором месте пространства, распространяется во все стороны со скоростью, зависящей от свойств среды.
- Распространение электромагнитных волн зависит от электрических и магнитных⁴⁶ свойств



Электрический ток — это
направленное движение
заряженных частиц.

**Магнитное поле создается
движущимися заряженными частицами.**



Использование электромагнитных свойств пород в горном деле

Электромагнитные свойства горных пород используют:

- 1 - для получения информации о состоянии массива горных пород;
- 2 - для интенсификации технологии добычи и переработки полезных ископаемых.

- Соотношение между значениями падающих, отраженных и преломленных волн определяется **ВОЛНОВЫМ сопротивлением сред.**
- Волновое сопротивление неограниченной среды в простейшем случае равно:

$$Z = Z_0 \cdot \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}}$$

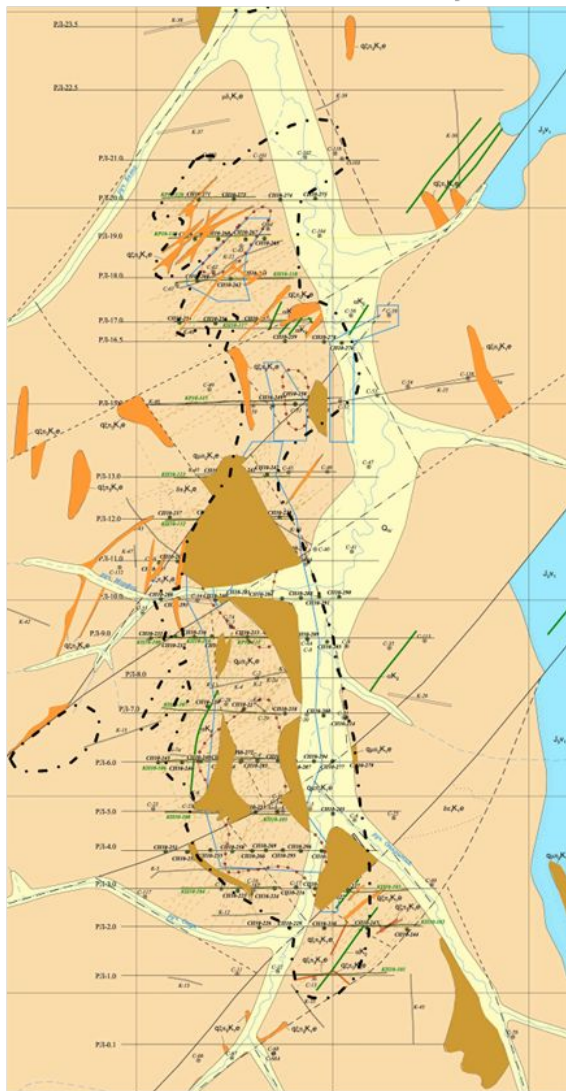
где $Z_0 = 120 \cdot \pi$, Ом – волновое сопротивление вакуума.

- В настоящее время получение информации о породах с использованием электромагнитных свойств наиболее широко используется в **геофизике**.
- При этом проводят последовательный замер потенциалов точек, расположенных по прямым линиям относительно одной центральной точки.
- Выявленные таким образом аномалии потенциала обычно указывают на наличие каких то неоднородностей в массиве пород.

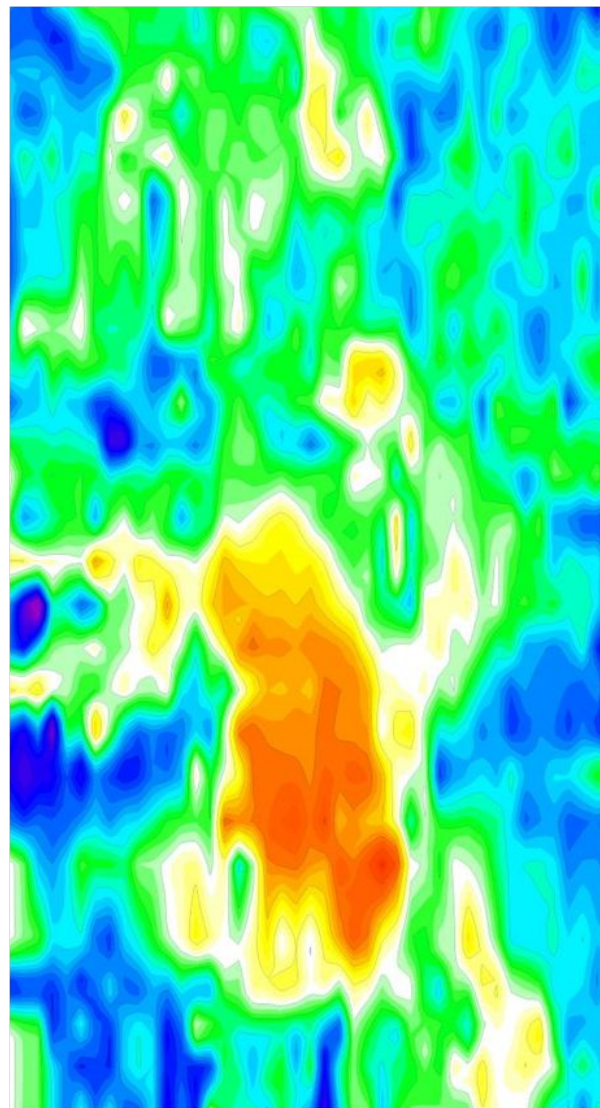
- Магниторазведка применяется также при поисках таких полезных ископаемых, как:
- полиметаллические, сульфидные, медно-никелевые, марганцевые руды, бокситы, россыпные месторождения золота, платины, вольфрама, молибдена и др.
- Это оказывается возможным благодаря тому, что в рудах в качестве примесей часто содержатся ферромагнитные минералы или же они сами обладают повышенной магнитной восприимчивостью.

Чукотка. Баимская рудная зона. Метасоматиты.

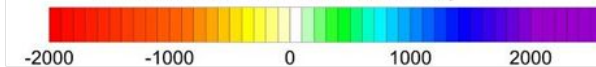
Геологическая карта



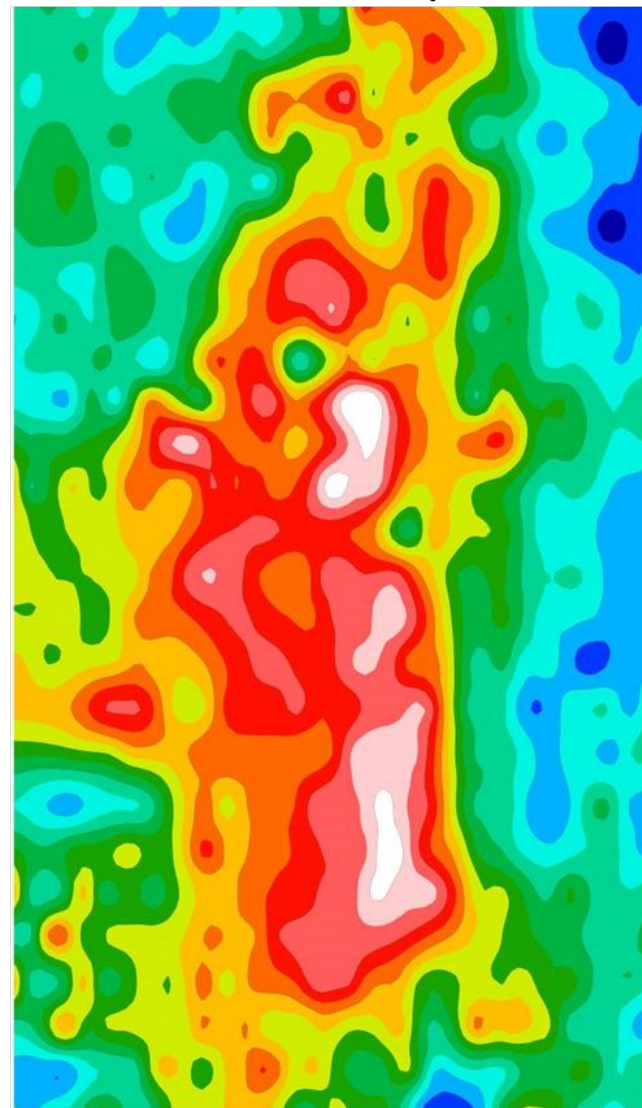
Магнитное поле



Аномальное магнитное поле, нТл



Вызванная поляризация

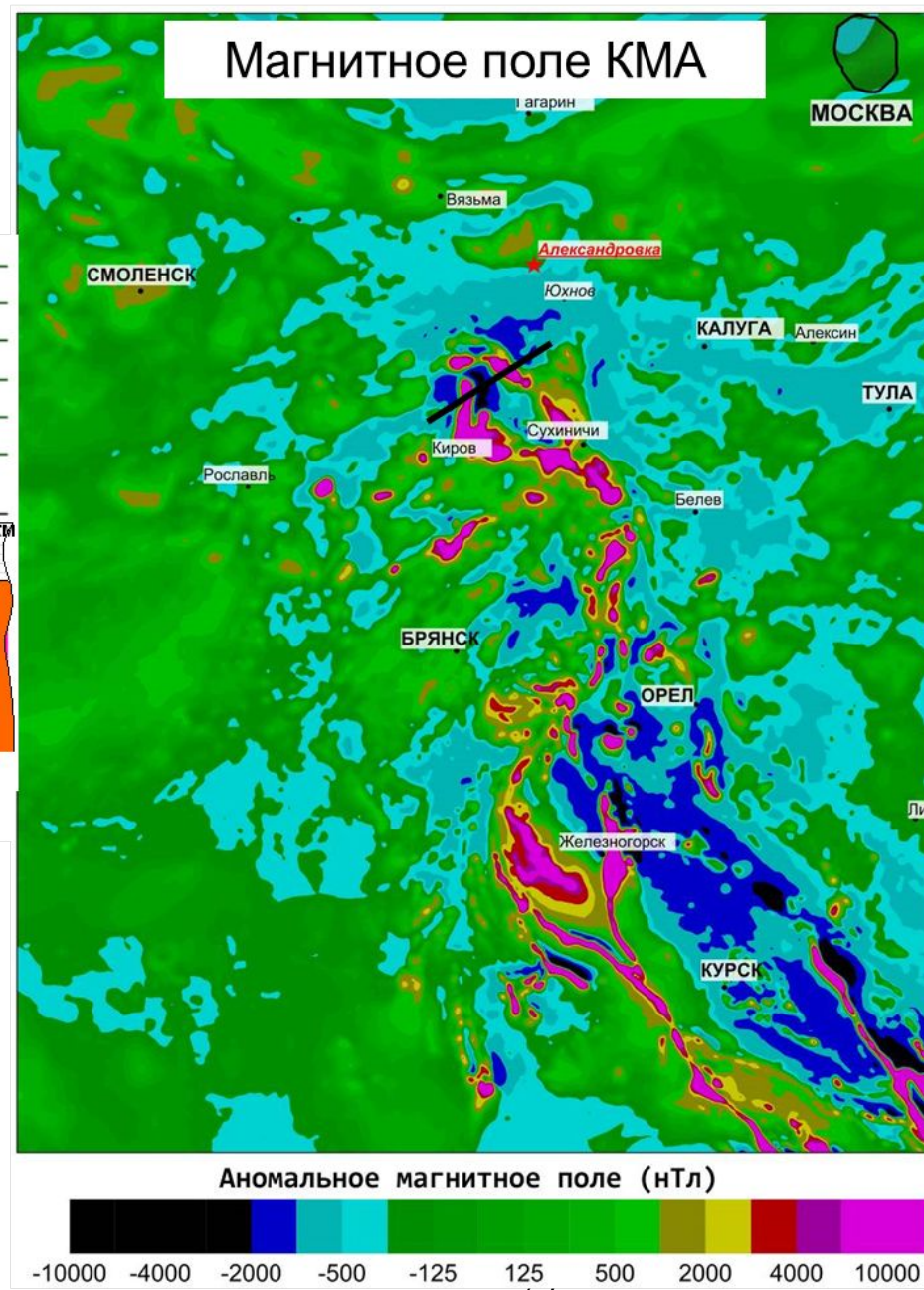
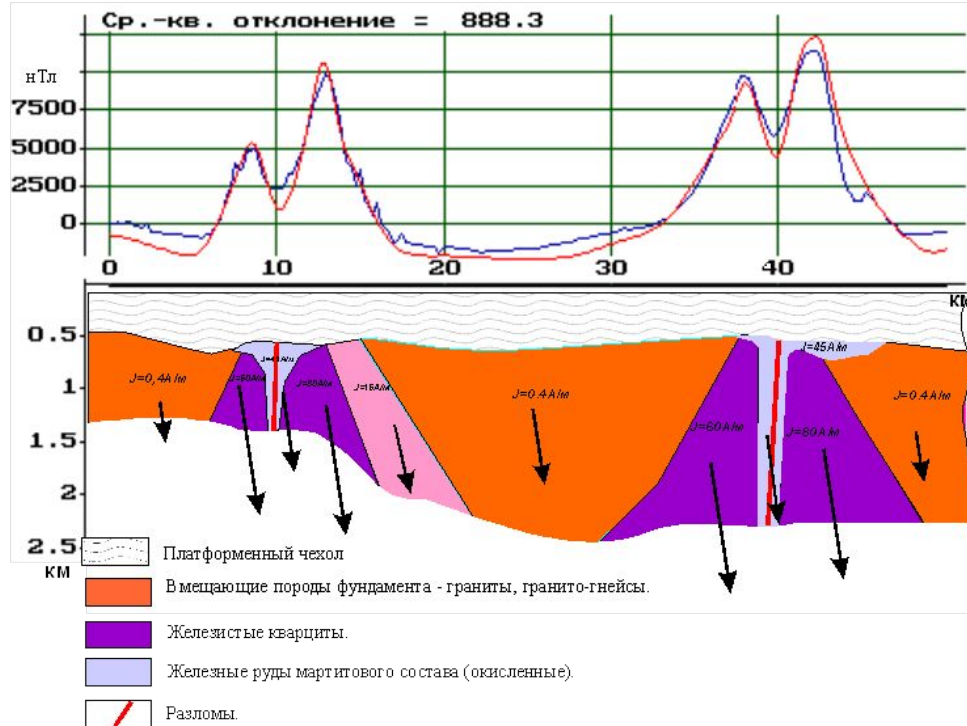


Кажущаяся поляризуемость, %



Курская магнитная аномалия

Двумерный подбор по профилю Барятино-Мосальск

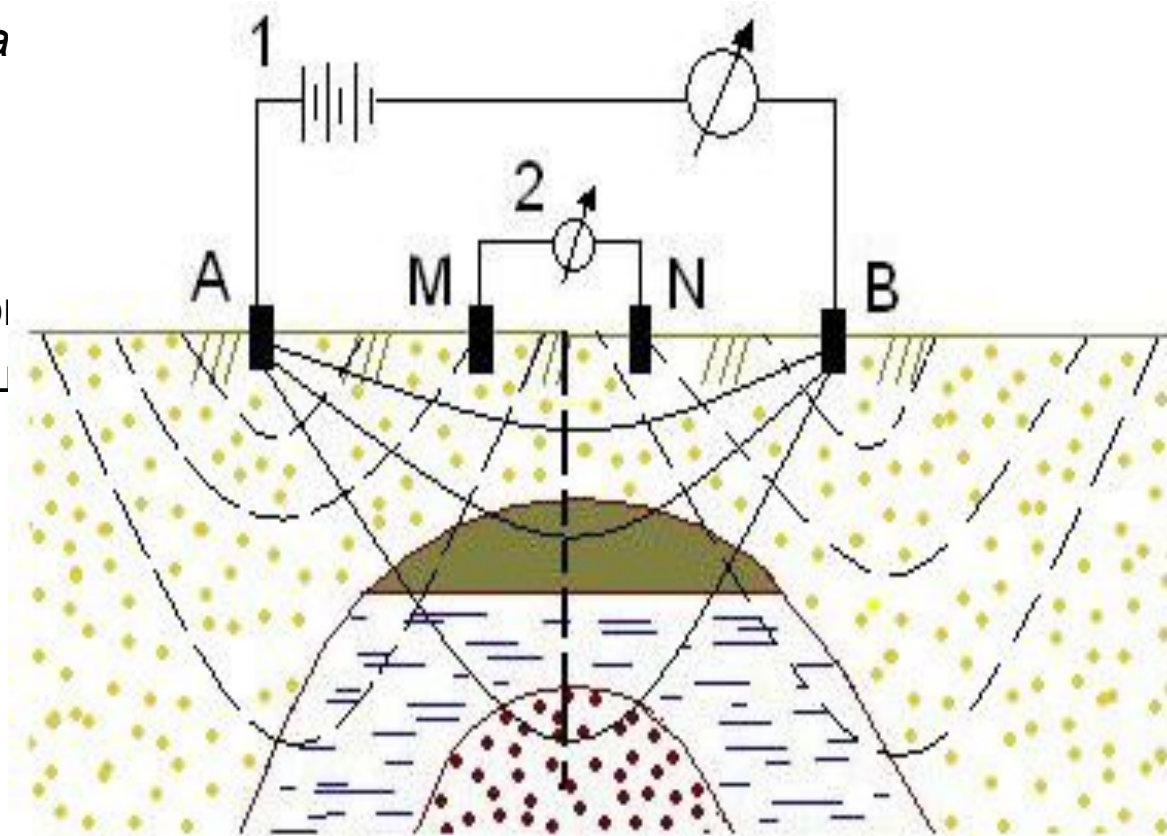


- *Метод вызванной поляризации* основан на изучении полей, создаваемых вторичными электрическими зарядами.
- Эти заряды возникают в земле при пропускании через нее постоянного или низкочастотного (до 100 Гц) электрического тока.

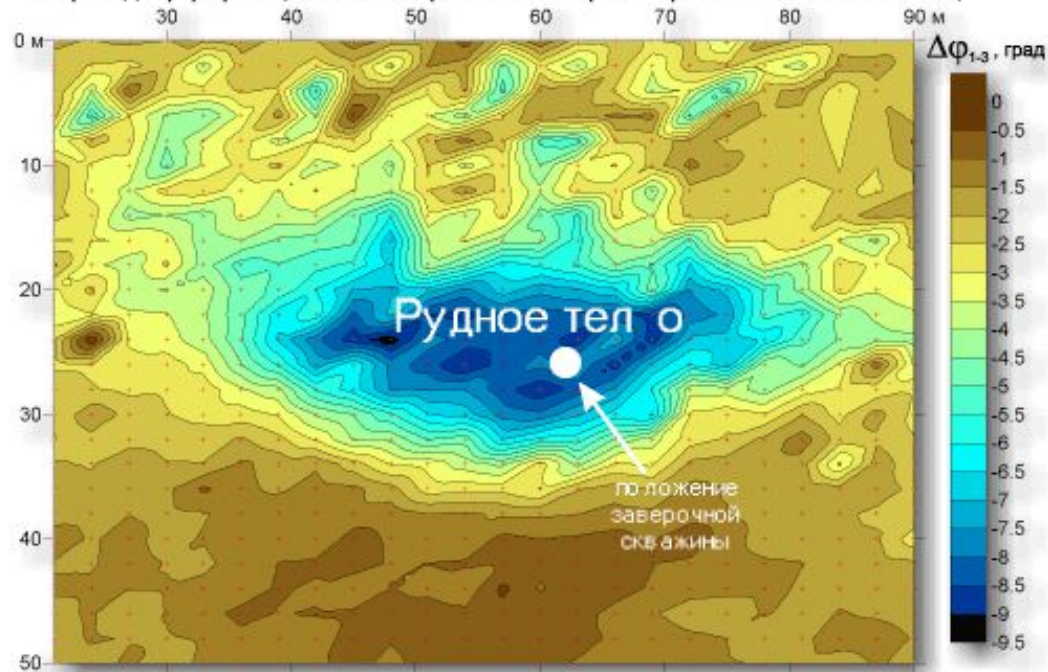
Геофизические методы

Электрическая разведка основана на различной электропроводности горных пород. Так, граниты, известняки, песчаники, насыщенные соленой минерализованной водой, хорошо проводят электрический ток, а глины, песчаники, насыщенные нефтью, обладают очень низкой электропроводностью. Через металлические стержни *A* и *B* сквозь грунт пропускается

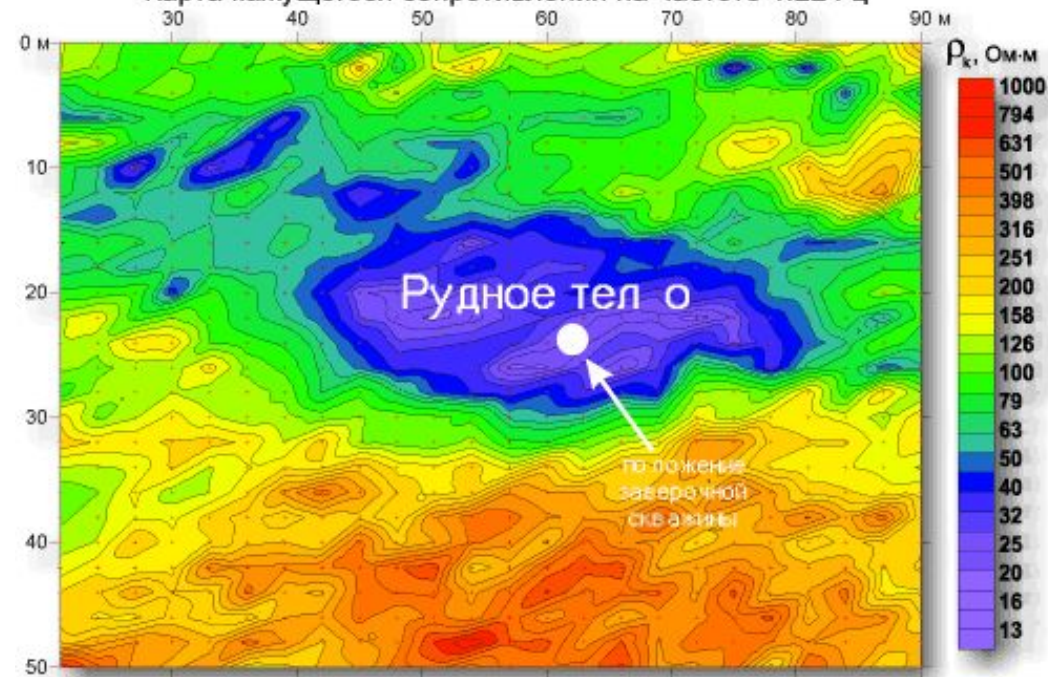
электрический ток, а с помощью стержней *M* и *N* и специальной аппаратуры исследуется искусственно созданное электрическое поле. На основании выполненных замеров определяют электрическое сопротивление горных пород. Высокое электросопротивление является косвенным признаком наличия нефти или газа.



Карта дифференциального фазового параметра на частоте 1.22 Гц

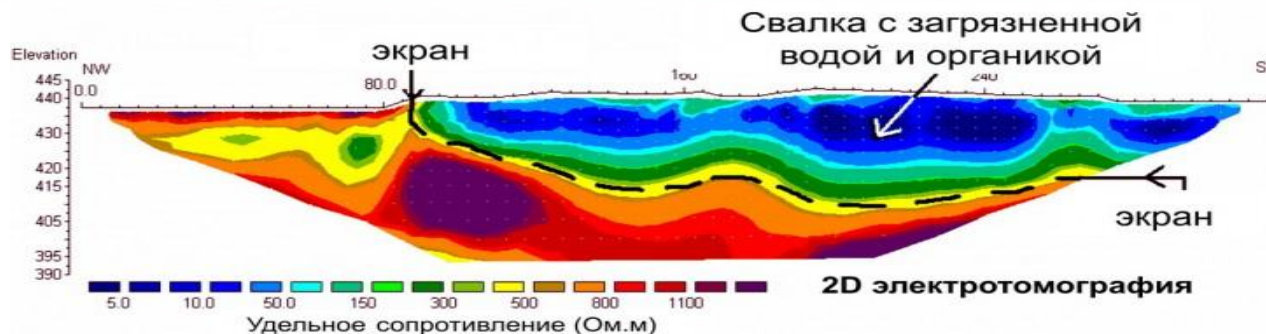
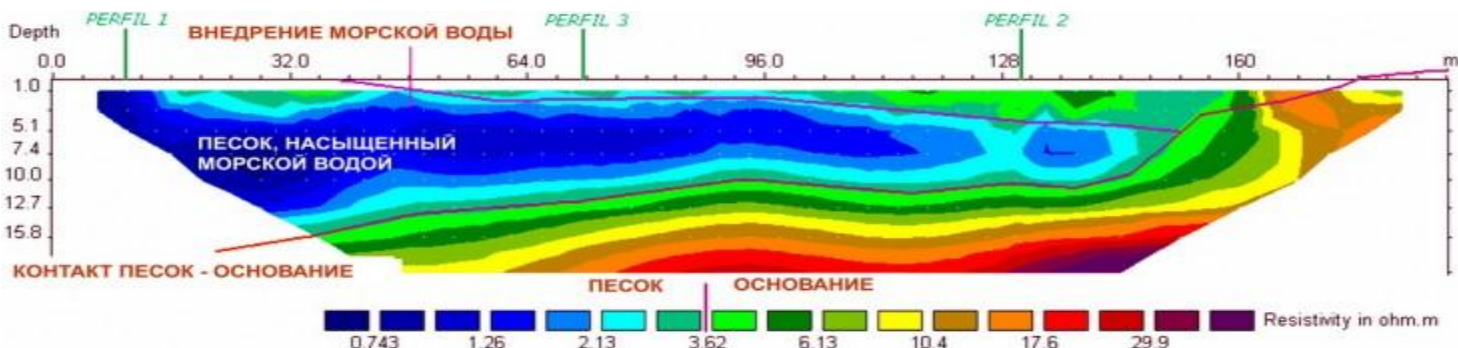
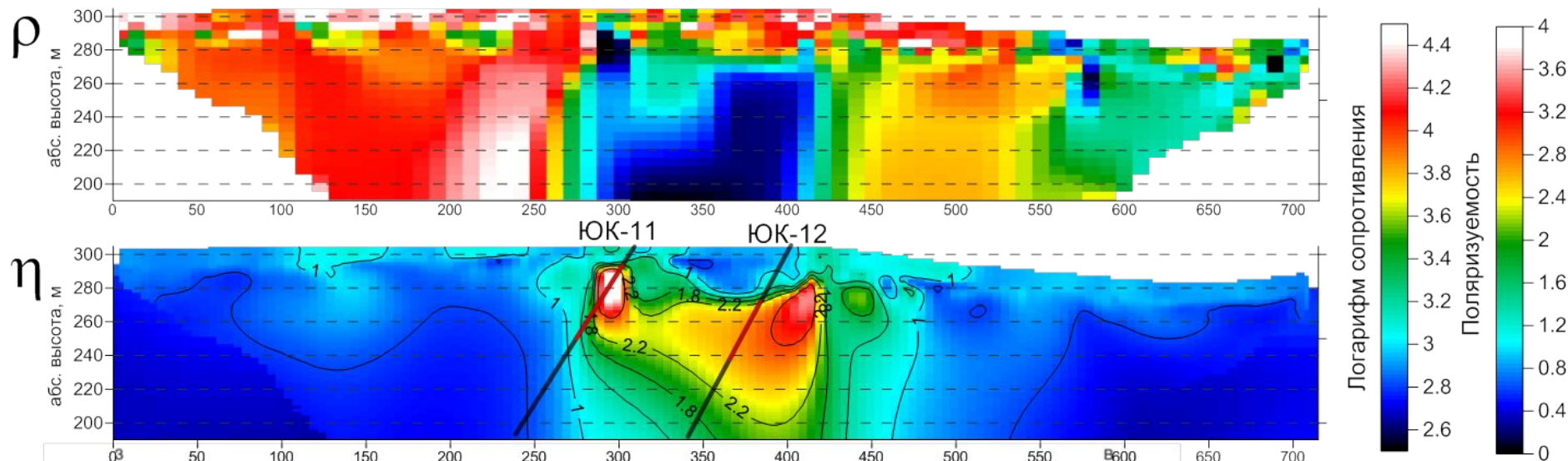


Карта кажущегося сопротивления на частоте 1.22 Гц



Кольский п-ов. Пример инверсии данных электротомографии

Условные обозначения:

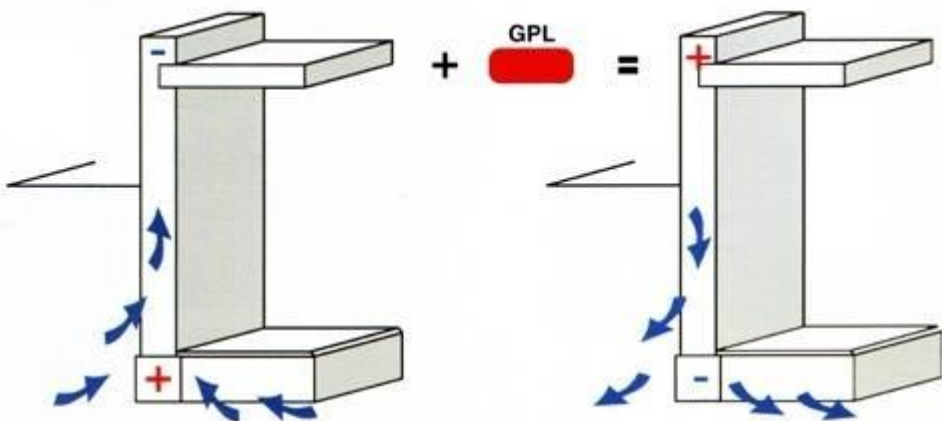
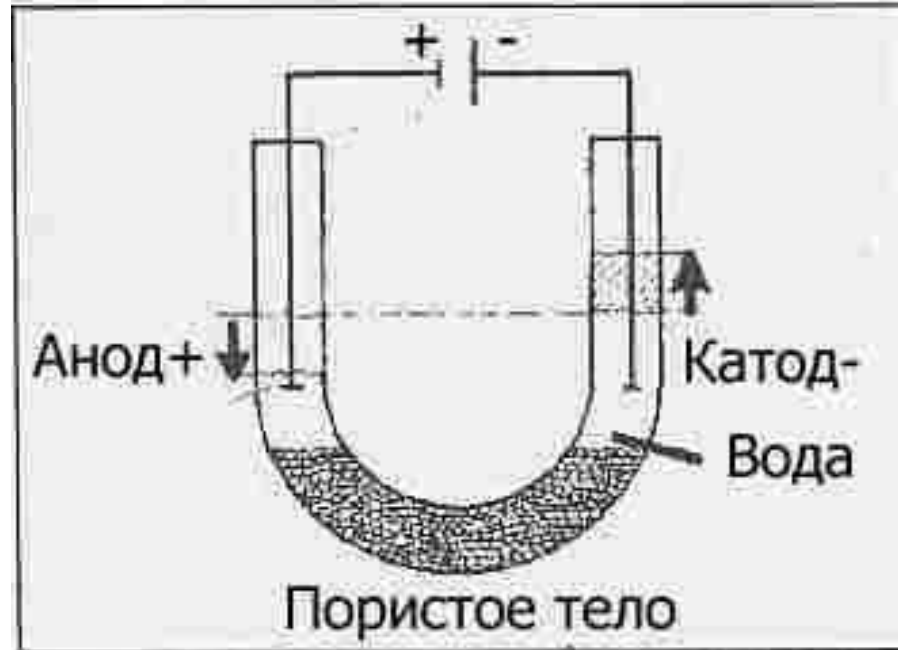


- **Электромагнитные свойства** используются для **ослабления и разрушения пород, упрочнения выработок и откосов, обогащения, осуществления других методов геотехнологии.**

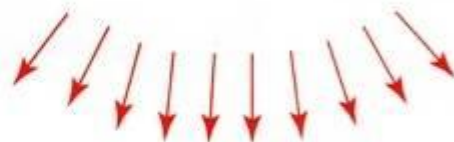
- Электромагнитные колебания частотой выше 300 МГц применяются в **радиоволновых** методах разрушения пород.
- При этом способе не существует непосредственного контакта излучающего электрода с разрушенной породой.

- Электромагнитная волна проникает в горную породу на некоторую глубину, которая зависит от свойств пород и частоты поля. На этой глубине происходит практически полное поглощение электромагнитной энергии.
- За счет этого порода разогревается, и появляются **термонапряжения** разрушающие породу.

- Электродинамические методы применяются на вспомогательных процессах. Для осушения горных пород, (обладающих слабой водоотдачей), используется электроосмос.
- Под действием постоянного электрического тока (напряжением около 40 В, силой тока 20-30 А) молекулы воды, находящиеся в породе, движутся к катоду, постепенно обезвоживая зону анода.

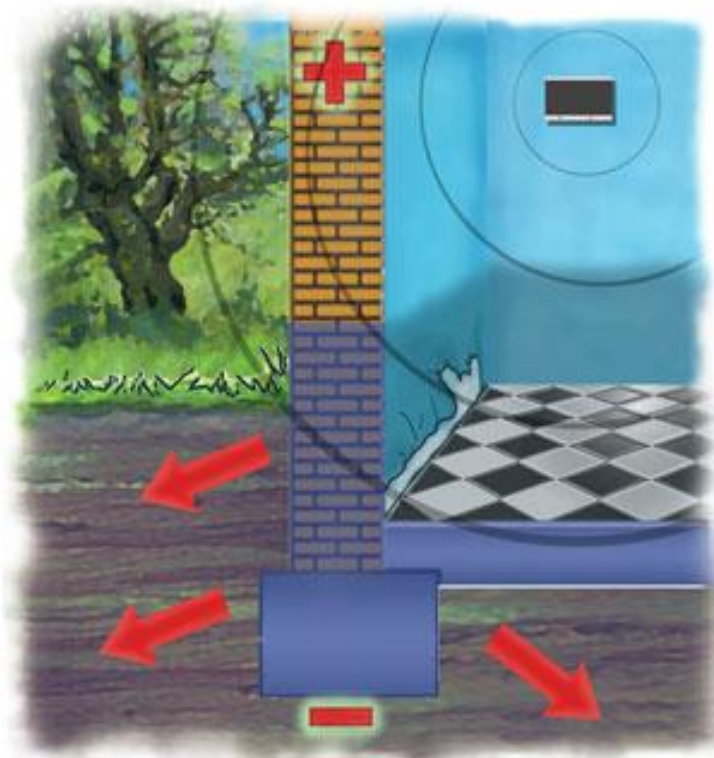


Перед подключением аппарата GPL –
капиллярное увлажнение стены



После подключения аппарата GPL –
обратное капиллярное движение влаги
с одновременным образованием активного
гидробарьера

valmos.ucoz.com

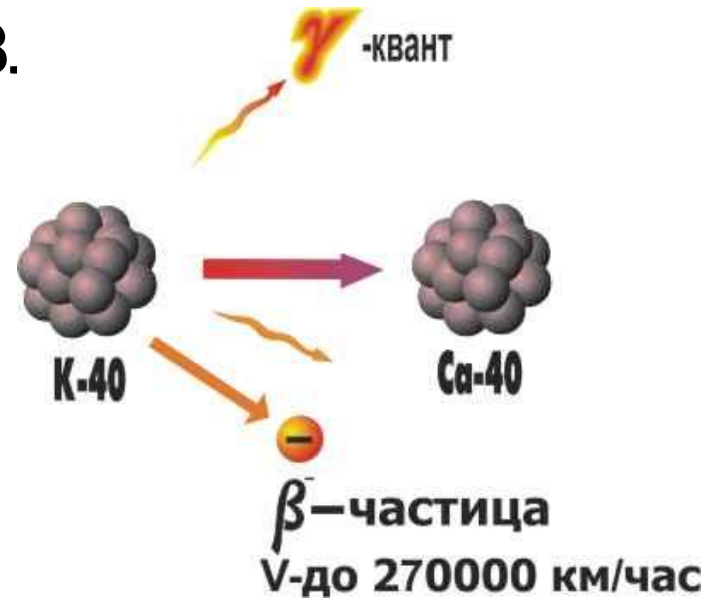


- При оттаивании мерзлых пород с помощью электроигл используется способность талой породы проводить электрический ток.
- Для упрочнения пород, уменьшения их склонности к набуханию, снижения водопритока используют электроплавление стенок выработок, бортов карьеров, отвалов, водосборников и т.д.

РАДИАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД

- К радиационным свойствам горных пород относят их естественную радиоактивность, а также параметры, определяющие рассеяние и поглощение горными породами внешнего из.

- γ -лучей, нейтронов
- и других частиц.



- Естественная радиоактивность пород обусловлена наличием в их составе либо минералов, содержащих радиоактивные элементы (уран U, торий Th, радий Ra), либо радиоактивных изотопов калия (K^{40}), кальция, рубидия, циркония, олова, теллура, вольфрама, кобальта, рения



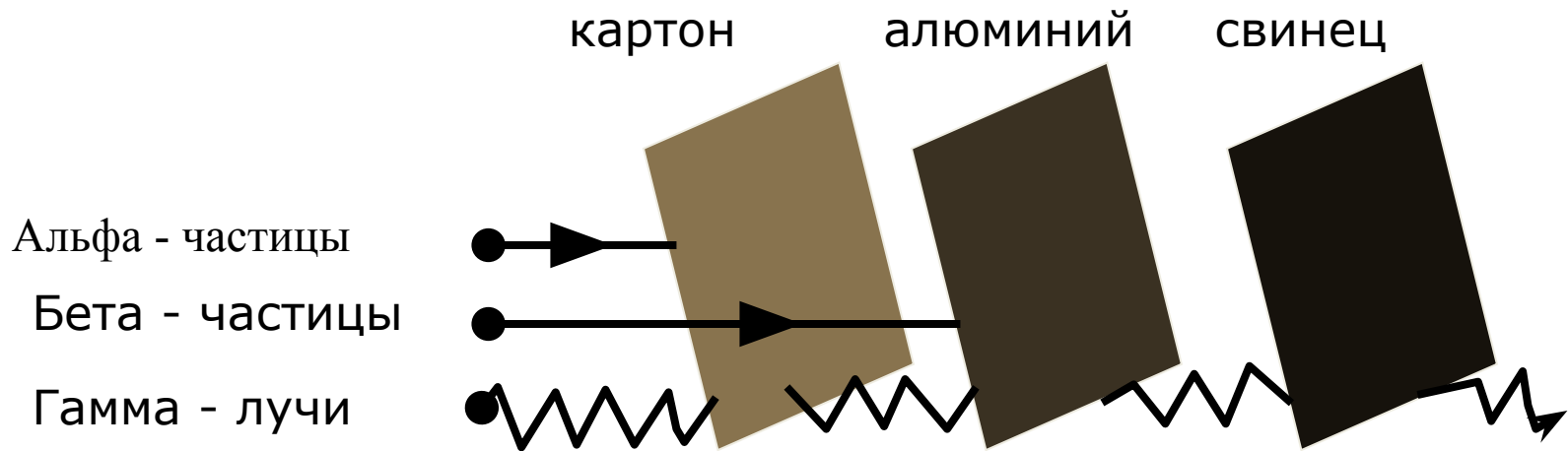
- Кроме того, ряд минералов обладает способностью **адсорбировать** из окружающей среды радиоактивные элементы и изотопы, вследствие чего наличие таких минералов в породах также повышает их радиоактивность.
- Так, повышенной радиоактивностью среди осадочных пород в результате сорбции элементов обладают **глина и глинистые сланцы**. Поэтому присутствие глин в осадочных породах (например, в мергелях) увеличивает их радиоактивность.

Как известно, при радиоактивном распаде, связанном с перестройкой ядер элементов, происходит излучение

α -, β -частицы и γ -лучи — это очень короткие электромагнитные волны с длиной менее $1 \text{ \AA}$ (Ангстрем) (10^{-10} м).



Альфа-излучение состоит из ядер гелия, бета-излучение — из электронов, гамма-излучение — из квантов. Оно родственно световому или рентгеновскому излучению.

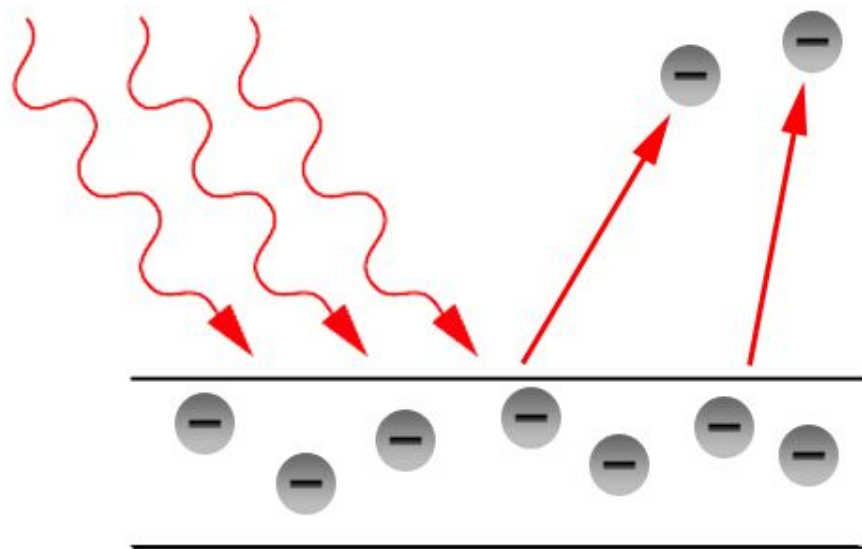


- Проникающая способность *γ -лучей* наибольшая.
- Пучок γ -квантов радиоактивного кобальта ослабляется в 2 раза лишь слоем свинца толщиной 1,6 см или алюминия толщиной 12 см.

- Величина радиоактивности горных пород оценивается параметром **удельной радиоактивности R** — количеством распадающихся за 1 с атомов в 1 кг вещества.
- Так, удельная радиоактивность радия составляет $3,7 \cdot 10^{13} \text{ с}^{-1} \cdot \text{кг}^{-1}$.

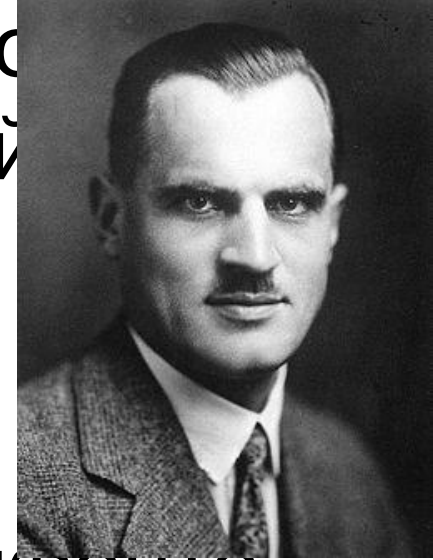
- Рассеяние и поглощение радиоактивного излучения и потока нейтронов в горных породах оцениваются коэффициентами поглощения и сечениями рассеяния и захвата.
- Проходя через вещество, γ -лучи теряют энергию вследствие поглощения и рассеяния

- **Поглощение** - γ -кванта происходит в результате того, что γ -квант вырывает электрон из электронной оболочки атома, передавая ему всю свою энергию (фотоэлектрический эффект).

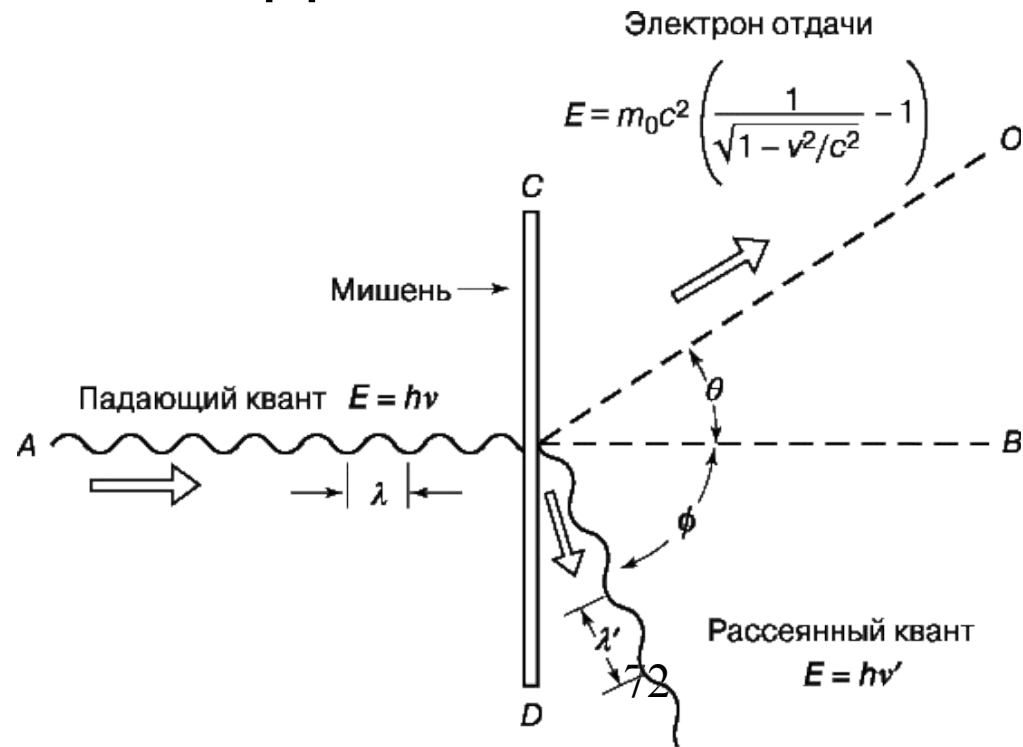
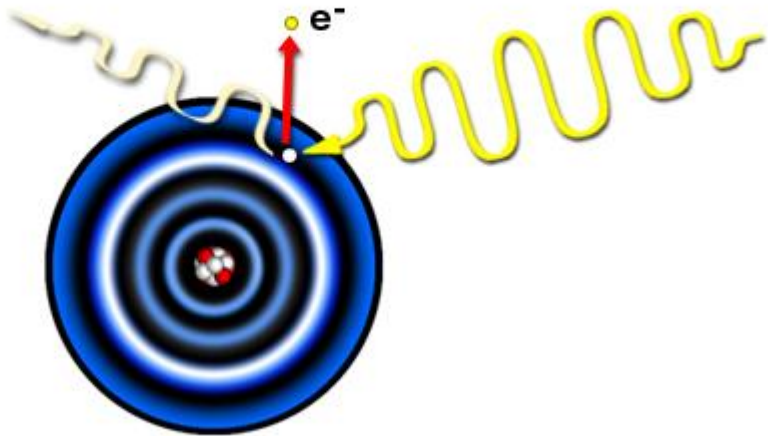


Рассеяние — это передача γ -квантом электрону атома только части своей энергии (Комптон-эффект).

Артур Холли Комптон



В результате уменьшается энергия кванта, меняется направление его движения.



- В горных породах преобладает рассеяние — доля энергии, идущей на рассеяние, составляет около 90 % общих потерь.
- Полный коэффициент поглощения γ - лучей равен сумме коэффициентов собственно поглощения и рассеяния.
- Чем больше плотность породы, тем сильнее поглощение - γ -лучей.