

Лекция 1. Бакалавриат

ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКА

ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКА

Электрическая разведка или просто электроразведка - это большая группа геофизических методов изучающих электромагнитные поля различной природы. Целью этих исследований является определение электромагнитных характеристик геологической среды (сопротивление (Ом), проводимость (Сименс, См), поляризуемость (%)) и т.д.), зная которые можно получить ценную информацию о строении изучаемого участка или района.

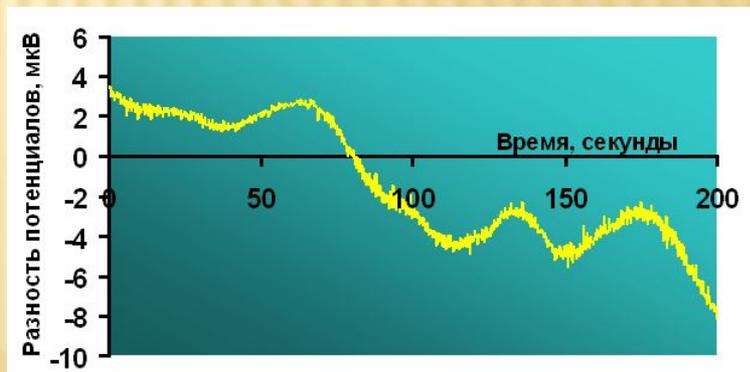
По виду электромагнитных полей электроразведку можно разделить на два отдела: первый - объединяет методы, исследующие естественные, второй - искусственные электромагнитные поля.

ЕСТЕСТВЕННЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПОЛЯ

Для обнаружения естественного электрического поля можно воспользоваться достаточно простым устройством, представляющим собой провод, к концам которого прикреплены **электроды**, не создающие собственные электрические поля (неполяризующиеся электроды). Один из электродов соединен с проводом через **потенциометр (миковольтметр)**. Подобные устройства в электроразведке называются **установками**



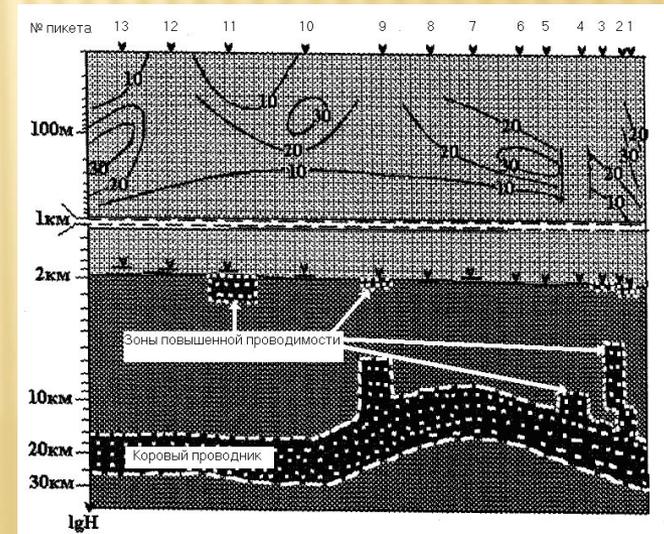
Электроразведочная установка для измерения естественного электрического поля



Вариации электрического поля

ПЕРЕМЕННЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПОЛЯ

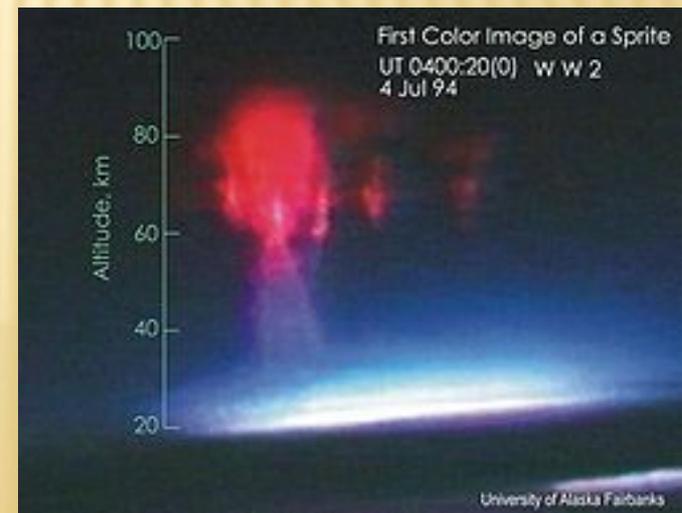
- К естественным переменным электромагнитным полям относятся квазигармонические низкочастотные поля космической (их называют магнитотеллурическими) и атмосферной (грозовой) природы ("теллурики" и "атмосферики").
 - Происхождение магнитотеллурических полей объясняется воздействием на ионосферу Земли потока заряженных частиц, посылаемых космосом (в основном, корпускулярным излучением Солнца). В приполярных областях, реже в средних широтах можно непосредственно наблюдать этот процесс в виде полярных сияний.
 - Вызываемые разной активностью Солнца и солнечным ветром периодические (11-летние), годовые, суточные вариации магнитного поля Земли и магнитные бури создают возмущения в магнитосфере и ионосфере. Вследствие индукции в Земле и возникают магнитотеллурические поля.
 - Изучая поля различной частоты можно получить данные характеризующие электромагнитные свойства земной коры и мантии на различных глубинах.



ЕСТЕСТВЕННЫЕ ПЕРЕМЕННЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПОЛЯ

Грозовой
разряд

- Происхождение естественных переменных полей атмосферной природы связано с грозовой активностью. При каждом ударе молнии в Землю (по всей поверхности Земли в среднем каждую секунду число молний равно примерно 100) возбуждается электромагнитный импульс, распространяющийся на большие расстояния. В целом под воздействием гроз в верхних частях Земли повсеместно и всегда существует слабое грозное поле, которое называют шумовым. Оно состоит из периодически повторяемых импульсов (цугов), носящих квазисинусоидальный характер с преобладающими частотами от 10 Гц до 10 кГц и напряженностью электрической составляющей в доли мВ/м.



Первое цветное
изображение
спрайта, снятое с
самолёта

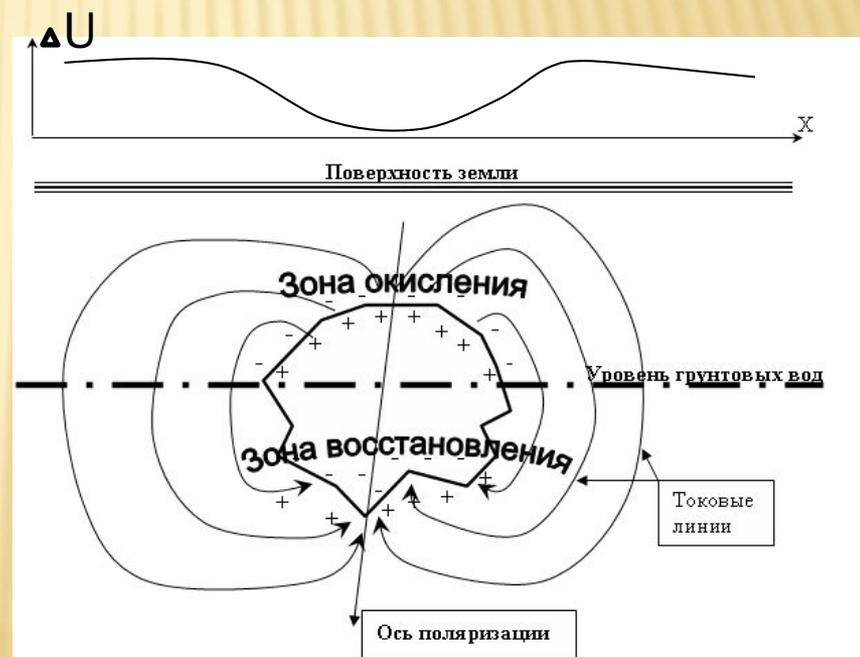
ЕСТЕСТВЕННЫЕ ПОСТОЯННЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПОЛЯ

- К естественным постоянным электрическим полям (ЕП) относятся поля *электрохимической и электрокинетической природы*.
- *Электрохимическими* являются ЕП, которые обусловлены либо окислительно-восстановительными реакциями, протекающими на границах проводников: электронного (рудные минералы - например, сульфиды, окислы) и ионного (окружающие породы подземные воды), либо разностью окислительно-восстановительного потенциала подземных вод вдоль проводящего слоя (например, графита, антрацита).
- Электрокинетические постоянные естественные поля (ЕП) обусловлены диффузионно-адсорбционными и фильтрационными процессами в горных породах, насыщенных подземными водами.

ПОЛЯ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ПРИРОДЫ

- Интенсивность потенциалов ЕП определяется распределением кислорода по глубине и изменением водородного показателя кислотности подземных вод (рН).
- В верхних частях залежей, где больше атмосферного кислорода, идут окислительные реакции, которые сопровождаются освобождением электронов.
- В нижних частях залежей, где преобладают застойные воды, идут восстановительные реакции с присоединением электронов.
- Во вмещающей среде и подземной воде наблюдается обратное распределение ионов, а в целом образуются гальванические элементы с катодом вверху и анодом внизу

Естественное постоянное электрическое поле электрохимической природы

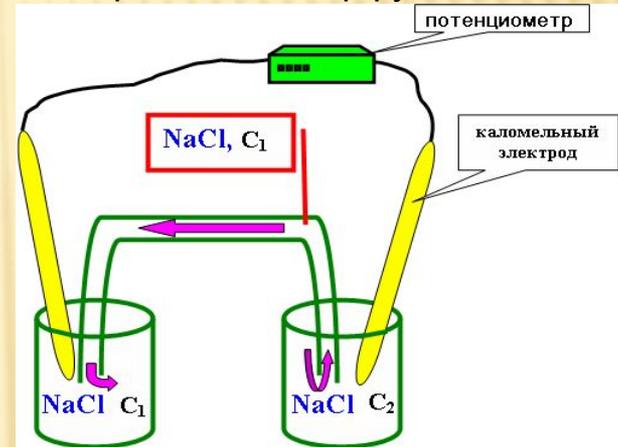


ЭЛЕКТРОКИНЕТИЧЕСКИЕ ЕСТЕСТВЕННЫЕ ПОЛЯ

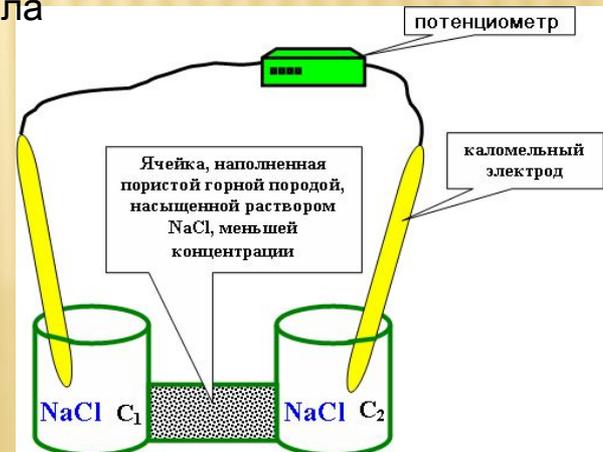
Благодаря различной подвижности катионов и анионов происходит неравномерное распределение зарядов в подземных водах разной концентрации, что и ведет к созданию естественного электрического поля диффузионной природы. Для наблюдения и изучения диффузионных потенциалов можно провести следующий опыт. Потребуется два химических стаканчика, или два других подходящих сосуда, и напомним их раствором NaCl различной концентрации (C_1 и C_2 , $C_1 < C_2$) (чем больше разность концентраций тем больше будет величина потенциала). Соединим стаканчики между собой с помощью стеклянной трубки наполненной раствором NaCl меньшей концентрации. Вследствие большей подвижности ионов Cl^- (примерно в 1.5 раза), последние будут переходить из стаканчика с более концентрированным раствором в другой стаканчик быстрее чем Na^+ . Возникнет потенциал, который и называется диффузионным, его можно измерить с помощью каломельных электродов и потенциометра.

Проведем подобный же опыт, но соединим стаканчики не с помощью трубки, а через ячейку, наполненную пористой горной породой (например – песчанником). Величина и знак, возникающего потенциала будет зависеть от адсорбционных свойств минералов, т.е. способности мелкодисперсных и коллоидных частиц удерживать на своей поверхности ионы того или иного знака. Поэтому разности потенциалов, возникающие при диффузии в породах подземных вод разной концентрации получили название диффузионно-адсорбционных.

Измерение диффузионного потенциала.
Фиолетовыми стрелками показано направление диффузии.

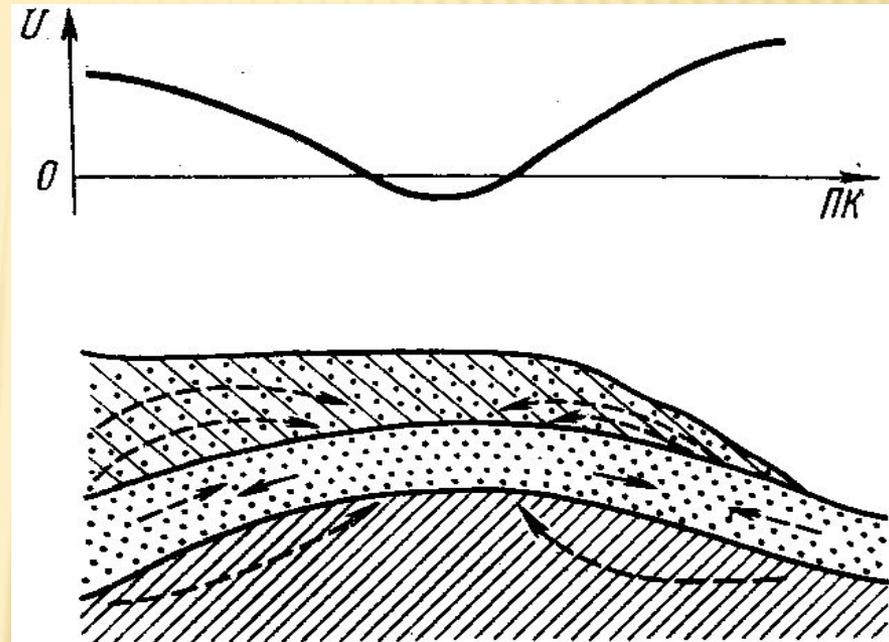


Измерение диффузионно-адсорбционного потенциала



ЭЛЕКТРОКИНЕТИЧЕСКИЕ ЕСТЕСТВЕННЫЕ ПОЛЯ

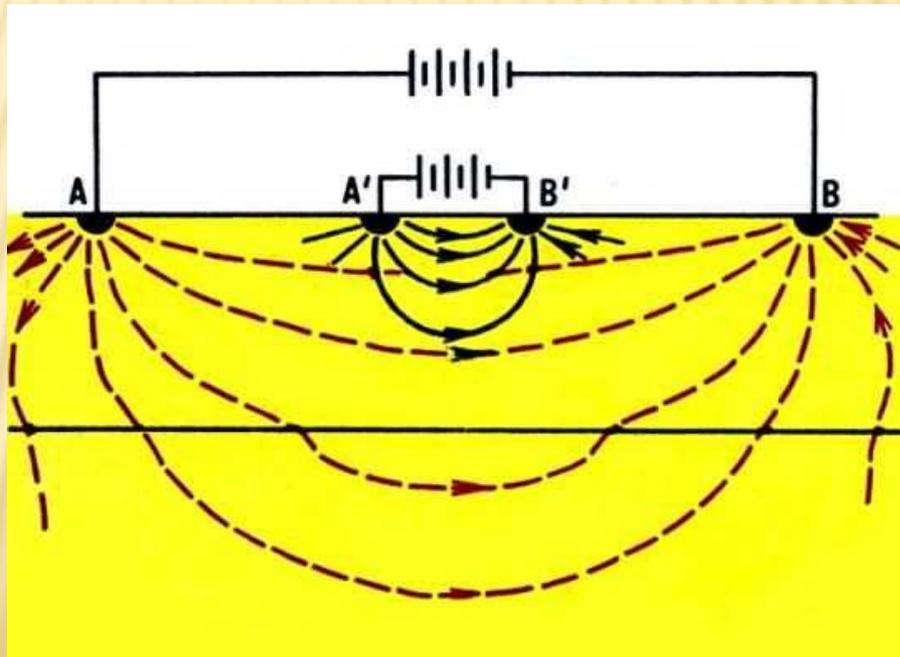
Естественные потенциалы наблюдаются также при движении (фильтрации) подземных вод через пористые породы. Границы и поры в горной породе можно рассматривать как капилляры, стенки которых способны адсорбировать ионы одного знака (чаще всего отрицательные). В жидкой среде накапливаются заряды противоположного знака. Чем больше скорость движения подземных вод (или давление на концах капилляров), тем больше будет разность потенциалов ЕП. Знак ЕП зависит от направления течения подземных вод: положительный потенциал возрастает в направлении движения воды. Места оттоков подземных вод выделяются отрицательными потенциалами, а притоков - положительными.



Черные сплошные стрелки –
направление движения подземных
вод, пунктирные стрелки токовые
линии

ИСКУССТВЕННЫЕ ПОСТОЯННЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПОЛЯ

- Искусственные постоянные электрические поля создаются с помощью батарей, аккумуляторов или генераторов постоянного тока, подключаемых с помощью изолированных проводов к стержневым электродам – заземлителям.



ПОЛЕ ТОЧЕЧНОГО ИСТОЧНИКА ПОСТОЯННОГО ТОКА

- Данная задача является простейшей задачей электроразведки постоянным током.
- Пусть электрод А посылает в Землю ток силой I (Ампер). Сопротивление воздуха бесконечно велико, поэтому весь ток растекается в Земле, имеющей сопротивление ρ (Ом). Земля однородна, следовательно, ток от источника течет равномерно по всем направлениям, т.е. линии плотности тока представляют собой прямые лучи, исходящие из точки А. Окружим точку А полусферой S произвольного радиуса r с центром в точке А. Очевидно, что сила тока, проходящая через нее, равна полной силе тока I . Следовательно, плотность тока в любой точке М, расположенной на полусфере, равна силе тока, деленной на площадь полусферы. Из этого следует:
 - $U = (I \times \rho) / 2\pi r$
 - Итак, потенциал точечного источника (Вольт) пропорционален силе тока I и сопротивлению ρ и обратно пропорционален расстоянию до источника r .
 - Очевидно, что напряженность электрического поля, как производная потенциала, будет убывать при удалении от точечного источника как $1/r^2$.

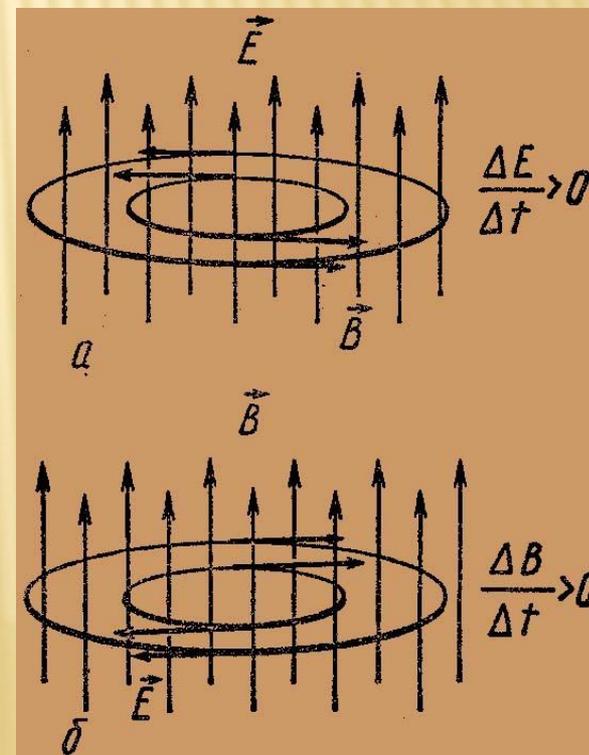
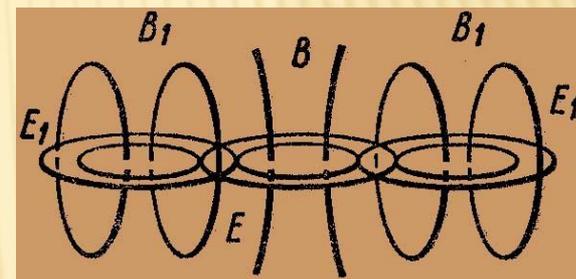


ИСКУССТВЕННЫЕ ПЕРЕМЕННЫЕ ГАРМОНИЧЕСКИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПОЛЯ

- Искусственные переменные гармонические электромагнитные поля создаются с помощью разного рода генераторов синусоидального напряжения частоты, подключаемых к гальваническим (заземленные линии) или индуктивным (незаземленные контуры) датчикам (источникам) поля. С помощью других заземленных (приемных) линий или незаземленных контуров измеряются соответственно электрические (Е) или магнитные (Н) составляющие напряженности поля. Они определяются прежде всего **удельным электрическим сопротивлением (Ом×м)** вмещающей среды.

ИСКУССТВЕННЫЕ ПЕРЕМЕННЫЕ ГАРМОНИЧЕСКИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПОЛЯ

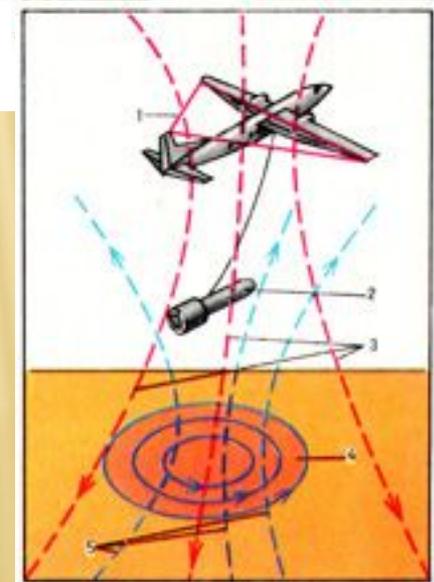
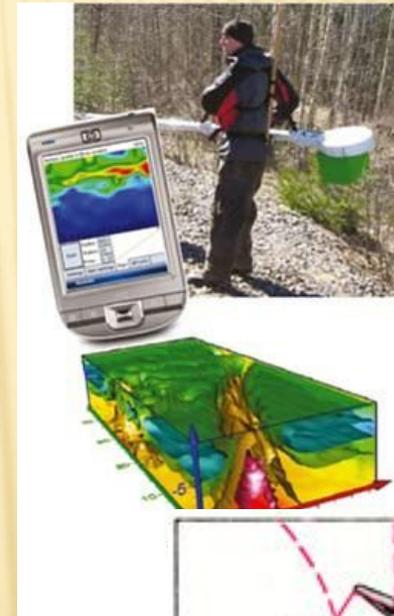
- Процесс распространения переменных магнитного и электрического полей и есть электромагнитная волна. Связь направлений векторов напряженности электрического поля и индукции магнитного поля при возрастании напряженности и индукции представлена на рисунке
- *Условие возникновения электромагнитных волн.* Изменения магнитного поля происходят при изменении силы тока в проводнике, а сила тока в проводнике изменяется при изменении скорости движения электрических зарядов в нем, т.е. при движении зарядов с ускорением. Следовательно, электромагнитные волны должны возникать при ускоренном движении электрических зарядов.
- Скорость распространения электромагнитных волн в вакууме по расчетам Максвелла должна быть равной примерно 300000 км/с.



ИСКУССТВЕННЫЕ ПЕРЕМЕННЫЕ ГАРМОНИЧЕСКИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПОЛЯ

- Чем выше сопротивление, тем меньше скин-эффект и больше глубина проникновения поля. С другой стороны, чем ниже сопротивление, тем больше интенсивность вторичных вихревых электромагнитных полей, индуцированных в среде.
 - Скин-эффект (от англ. skin — кожа, оболочка), поверхностный эффект, затухание электромагнитных волн по мере их проникновения в глубь проводящей среды, в результате которого, например, переменный ток по сечению проводника распределяется не равномерно, а преимущественно в поверхностном слое. СЭ обусловлен тем, что при распространении электромагнитной волны в проводящей среде возникают вихревые токи, в результате чего часть электромагнитной энергии преобразуется в теплоту. Это и приводит к уменьшению напряженностей электрического и магнитного полей и плотности тока, т. е. к затуханию волны.
- Вывод аналитических формул для связи между измеряемыми параметрами (E, H), силой тока в датчике поля, расстоянием между генераторными и измерительными линиями, их размерами и электромагнитными свойствами однородного полупространства очень сложен.
- На низких частотах (f кГц) расчет сопротивления однородного полупространства ведется по формуле
$$\rho = (K_w \times \Delta U(W)) / I,$$
где - K_w коэффициент установки, разный для различных способов создания и измерения поля, расстояний между источником и приемником, круговых частот ($W = 2\pi f$); $\Delta U(W)$ - разность потенциалов, пропорциональная составляющим E или H.

Над неоднородной средой по этой же формуле рассчитывается кажущееся сопротивление (ρ_w).



ИСКУССТВЕННЫЕ ИМПУЛЬСНЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПОЛЯ

Искусственные импульсные (неустановившиеся) электромагнитные поля создаются с помощью генераторов, дающих на выходе напряжение в виде прямоугольных импульсов постоянного тока разной длительности и подключаемых к заземленным или незаземленным линиям (петлям). С помощью других заземленных приемных линий или незаземленных контуров изучается процесс установления и спада разностей потенциалов или на разных временах (t) после окончания питающего импульса.

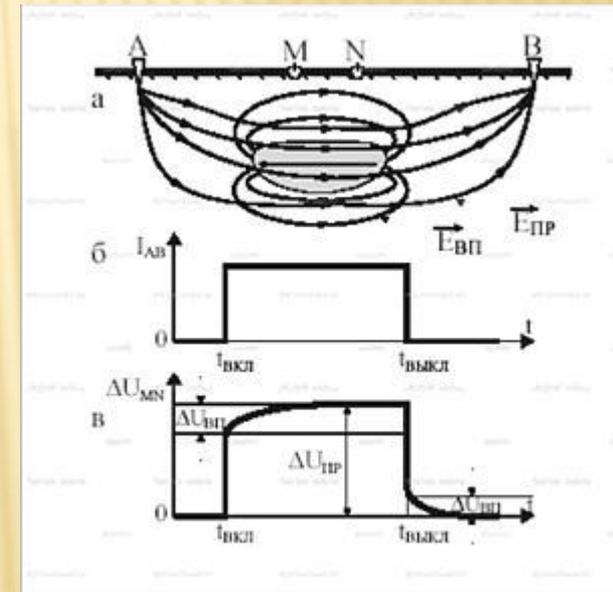
При зондировании геологической среды такими импульсами в ней происходят разнообразные физические процессы. В зависимости от способа создания и измерения поля и времени, на котором проводятся измерения, а также электромагнитных свойств горных пород различают неустановившиеся поля двоякой природы: **вызванной поляризации и переходных процессов или становления поля.**

ИСКУССТВЕННЫЕ ИМПУЛЬСНЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПОЛЯ

- Поля вызванной поляризации, или вызванные потенциалы (ВП), создаются путем гальванического возбуждения постоянного тока с помощью линии АВ и измерения разности потенциалов ВП на приемных электродах MN ($\Delta U_{\text{вп}}$) через 0,5-1 с после отключения тока, т.е. измеряется спад напряженности электрического поля, обусловленный разной вызванной поляризуемостью горных пород (η).
- Над однородным полупространством

$$\eta = (\Delta U_{\text{вп}} \times 100\%) / \Delta U$$

где ΔU - разность потенциалов на тех же приемных электродах во время пропускания тока. Над неоднородным полупространством рассчитанная по этой формуле величина называется кажущейся поляризуемостью (η_k).



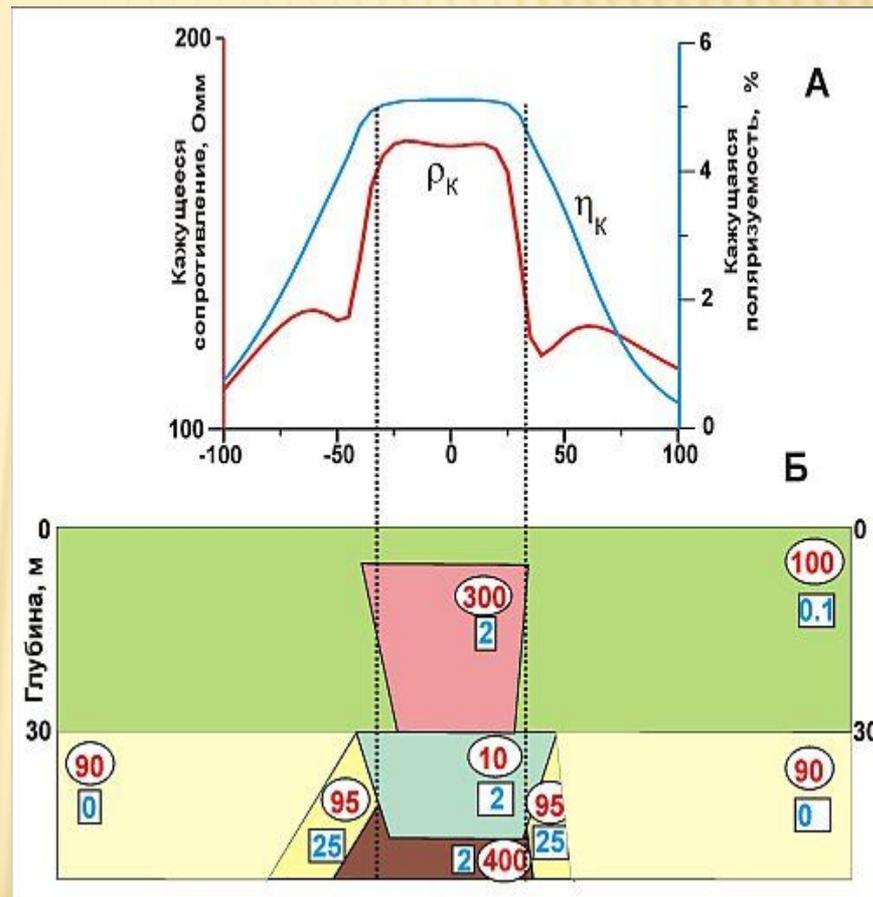
Измерение вызванной поляризации

ПОЛЯ ВЫЗВАННОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ

Интенсивные поля ВП создаются над средами, содержащими рудные (электропроводящие) минералы. При пропускании тока через такую среду в ней происходят электрохимические процессы, сходные с теми, которые наблюдаются при зарядке аккумулятора.

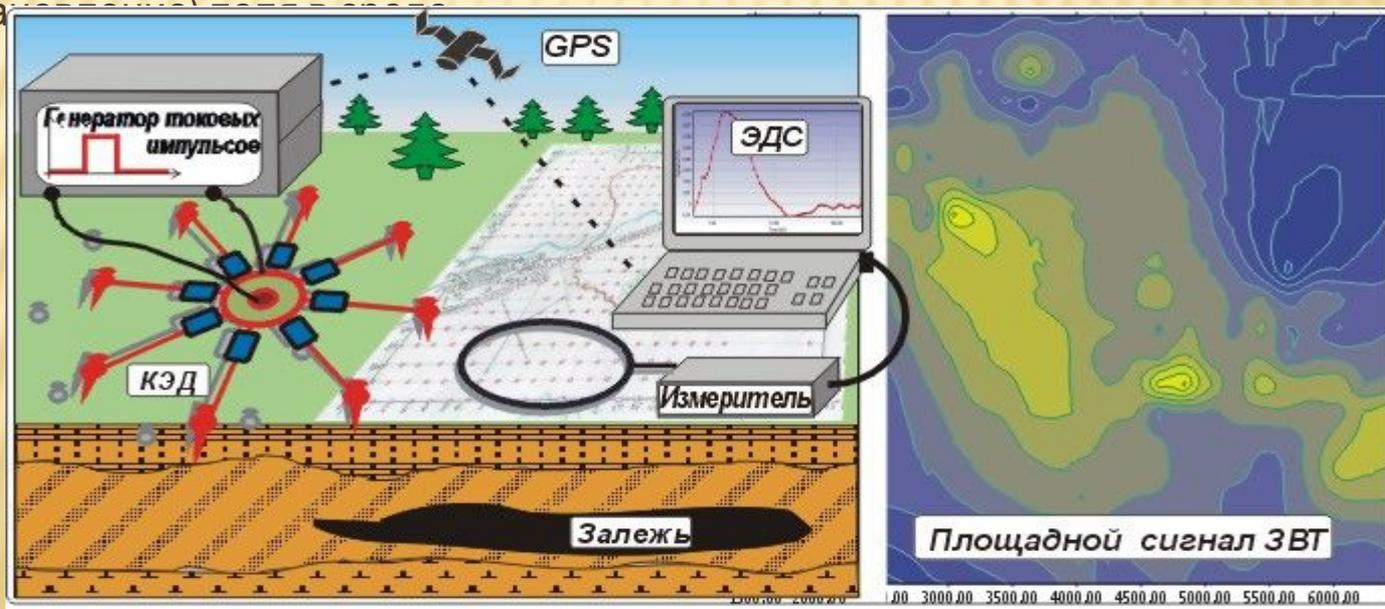
Во время пропускания тока на поверхности рудных минералов, окруженных подземной водой, осуществляется ряд физических превращений и химических реакций, приводящих к вынужденной поляризации среды. После отключения тока в среде начинает устанавливаться равновесие, проявляющееся в медленном спаде электрического поля и наличии на приемных электродах потенциалов в течение нескольких секунд.

В средах, где породообразующие минералы не проводят электрический ток, (ионопроводящие) образование полей ВП связано с перераспределением зарядов на контакте жидкой и твердой фаз, диффузией ионов через пористые среды, адсорбцией их на глинистых частицах и другими процессами.



ПОЛЯ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ИЛИ СТАНОВЛЕНИЯ ПОЛЯ.

- При импульсном или ступенчатом изменении тока в питающей линии (АВ) или незаземленном контуре (петля, рамка) в момент включения или выключения тока в проводящей геологической среде индуцируются вихревые вторичные электромагнитные поля. Из теории спектров и импульсной техники известно, что при резком изменении тока в среде возникает сигнал, который можно разложить в набор гармонических колебаний широкого спектра частот. Чем острее импульс или крутизна спада сигнала, тем более высокочастотные колебания содержатся в нем. С увеличением частоты растет скин-эффект (а значит, уменьшается глубина проникновения поля) и увеличиваются вторичные вихревые индукционные поля. Поэтому в зависимости от формы питающего импульса и сопротивления среды сигналы в ней по-разному искажаются. Изучая с помощью приемной линии (М N) или незаземленного контура (петли, рамки) разности потенциалов и на разных временах (t) после окончания питающего сигнала, можно получить форму искаженного средой сигнала, т.е. изучить переходные процессы или становление (уста



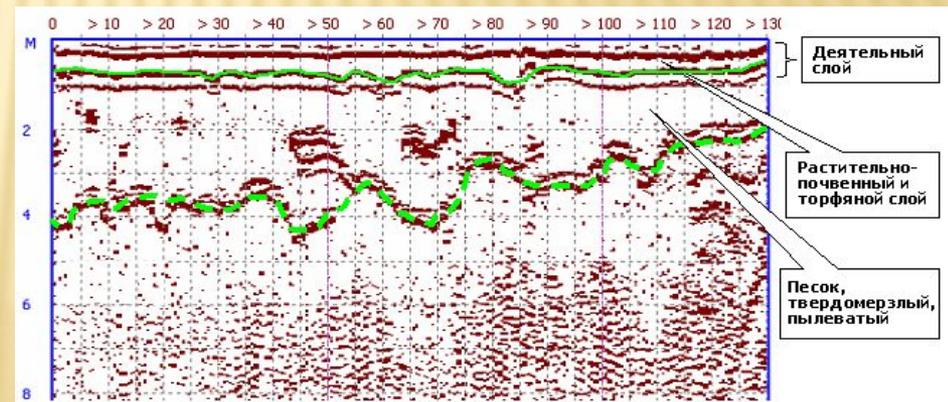
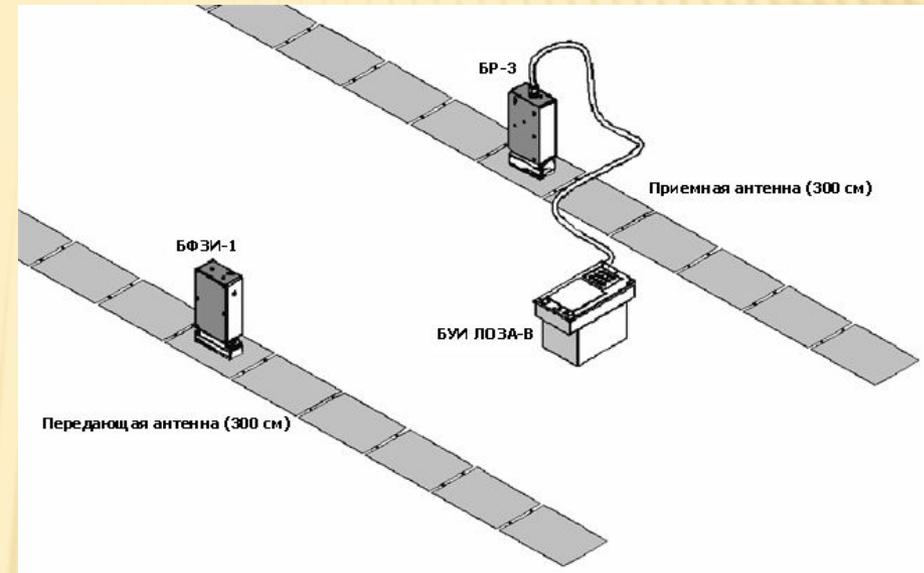
ПОЛЯ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ИЛИ СТАНОВЛЕНИЯ ПОЛЯ.

- Вывод аналитических формул для связи разностей потенциалов ($\Delta U_E(t)$, $\Delta U_H(t)$) от силы тока в питающей цепи (I), сопротивления однородного полупространства (ρ), расстояния (r) между центрами питающего и приемного устройств и их размеров сложен. Лишь для дальней ($r > 5H$) или ближней ($r > H$) зон от источника, где H - проектируемые глубины разведки, формулы для расчета имеют несложный вид:
$$\rho = (K_{дз} \times \Delta U(t)) / I \quad \text{или} \quad \rho = (K_{бз} \times [I / \Delta U(t)] \times t^{2/3})^{-5/3}$$
- где $K_{дз}$ и $K_{бз}$ - коэффициенты установок, разные для дальней и ближней зон от источника, зависящие от типа питающей и приемной линий, их размеров и разноса (r). Для неоднородной среды сопротивления, рассчитанные по этим формулам, называются кажущимися.

СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ ПОЛЯ

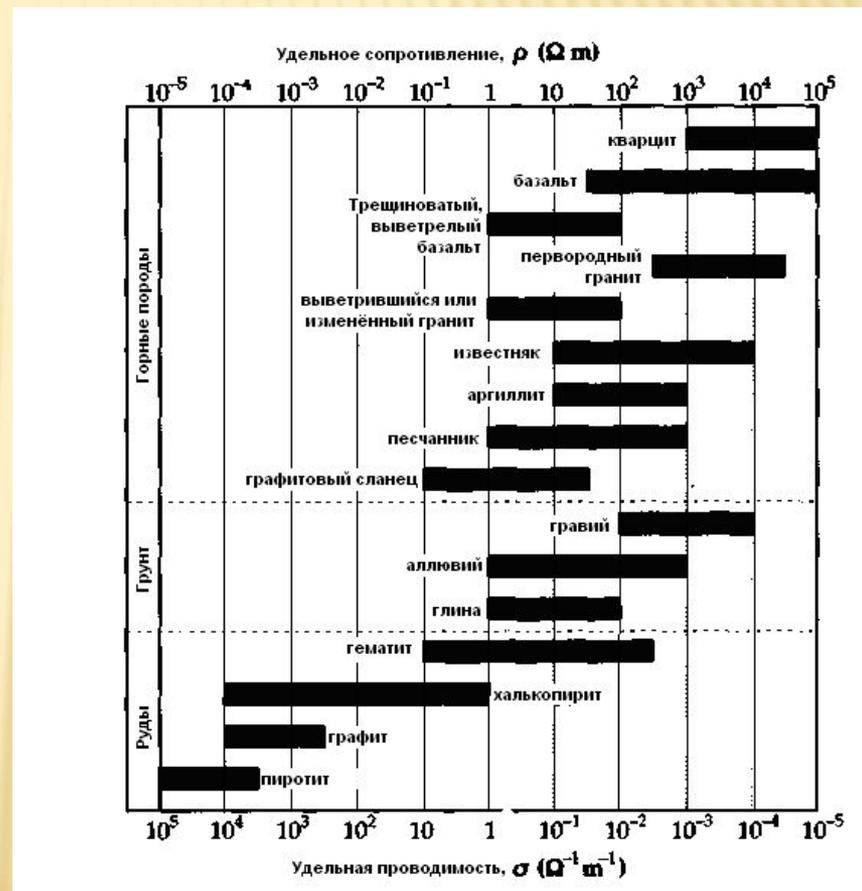
Сверхвысокочастотные электромагнитные поля с длиной волны от микрометров до метров используются для пассивной и активной радиолокации земной поверхности. Методы, основанные на их измерении, находятся на стыке электроразведки и терморазведки. При пассивной радиолокации изучаются естественно-техногенные радиотепловые (РТ) или инфракрасные (ИК) излучения земной поверхности. В разных диапазонах микрометровых длин электромагнитных волн существуют "окна прозрачности", позволяющие получать РТ или ИК - изображения земных ландшафтов при любой погоде и облачности. Интенсивность излучений зависит от солнечного и внутриземного нагрева верхних частей поверхности Земли, а также от искусственных источников тепла (города, промышленные предприятия и т.п.).

При активной радиолокации (аэрокосмической или полевой) земная поверхность облучается искусственными короткими радиолокационными импульсами, изучаются времена прихода и форма отраженных как от земной поверхности, так и от границ слоев с разными электромагнитными свойствами.



УДЕЛЬНОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ

Удельное электрическое сопротивление (УЭС), измеряемое в омметрах (Омм), характеризует способность пород оказывать электрическое сопротивление прохождению тока и является наиболее универсальным электромагнитным свойством. Оно меняется в горных породах и рудах в очень широких пределах: от 10^{-3} до 10^{15} Ом \cdot м. Величина обратная называется электропроводностью и измеряется в сименсах на метр (См / м). Для наиболее распространенных осадочных, изверженных и метаморфических горных пород УЭС зависит от минерального состава, физико-механических и водных свойств горных пород, концентрации солей в подземных водах и в меньшей мере от их химического состава, а также от некоторых других факторов (температуры, глубины залегания, степени метаморфизма и др.).



ДОП. ЛИТЕРАТУРА

- Справочник геофизика. Том «Электроразведка».