

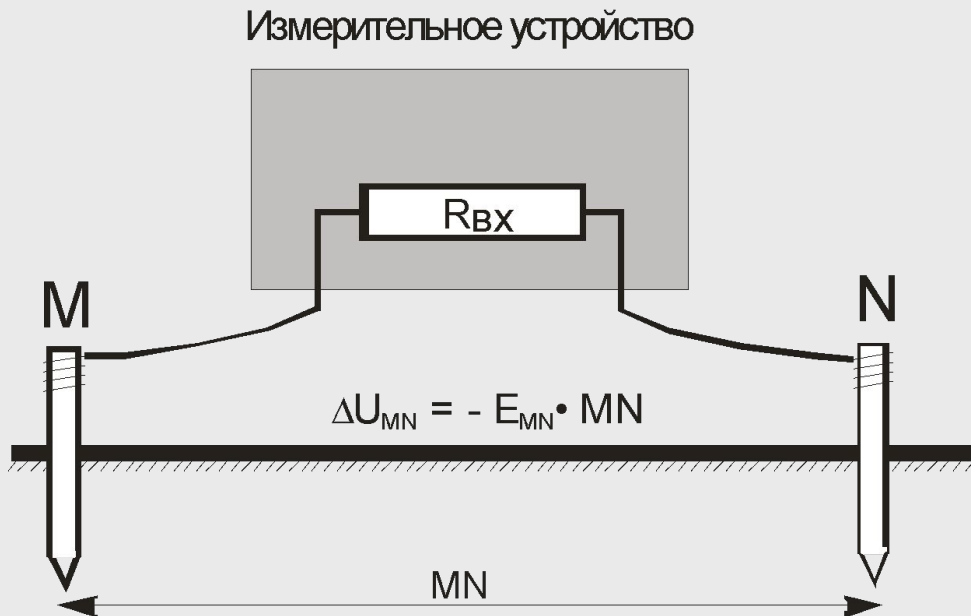
**Общие сведения об
изучаемых в
электроразведке полях**

**Шевнин Владимир Алексеевич
shevninvlad@yandex.ru**

Введение

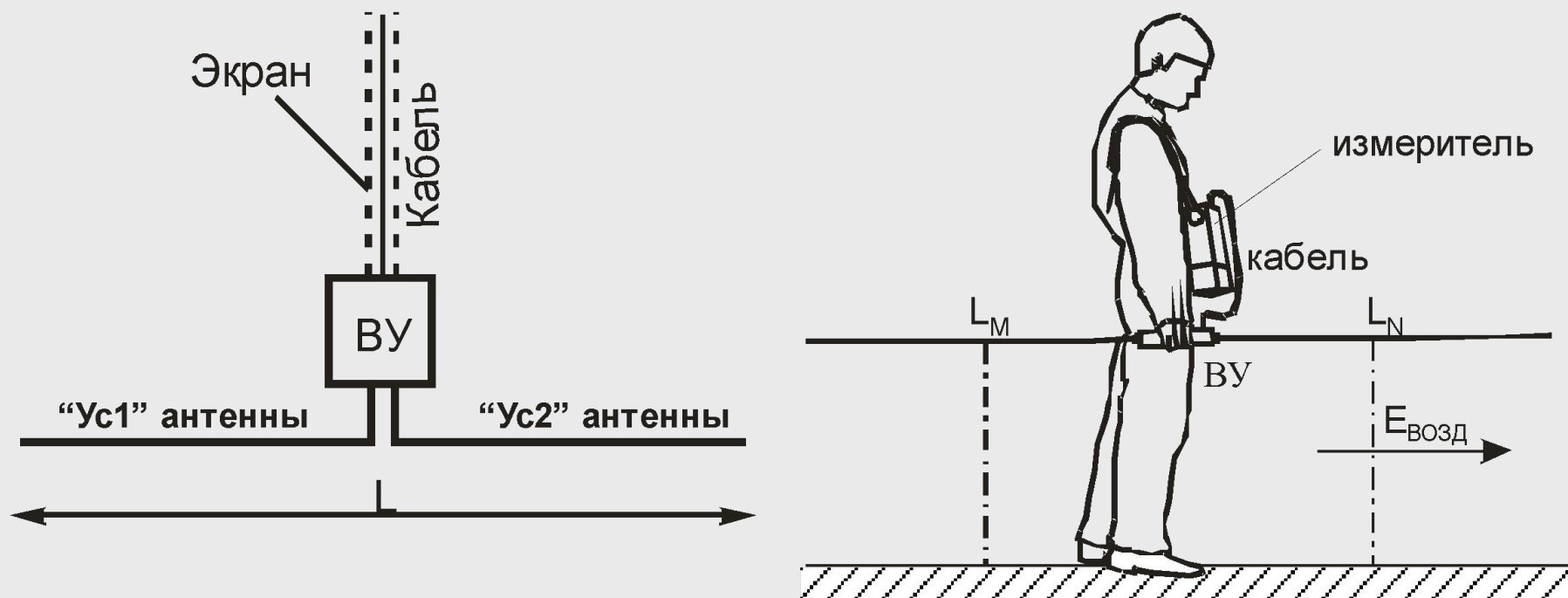
В электроразведке используют электрическое и магнитное поле. Но это поля могут быть в очень широком интервале частот от 0 до первых гигагерц (10^9 Гц), фиксированной частоты и разных частот, естественного и искусственного происхождения. Поля измеряют с помощью датчиков электрического и магнитного поля.

Простейшим датчиком электрического поля является заземленная электрическая линия.



Во многих случаях линия заземляется с помощью металлических электродов (сталь, медь, латунь), в некоторых случаях - с помощью неполяризующихся электродов.

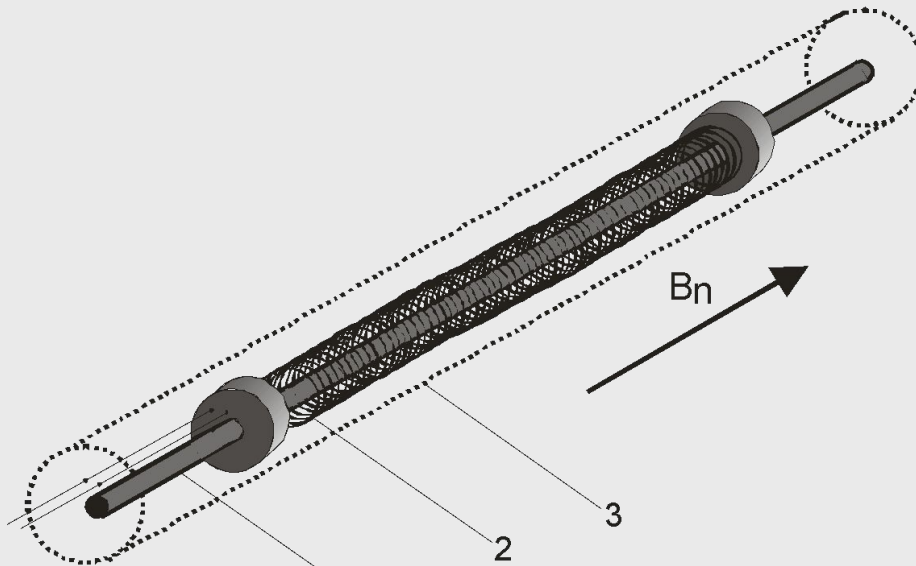
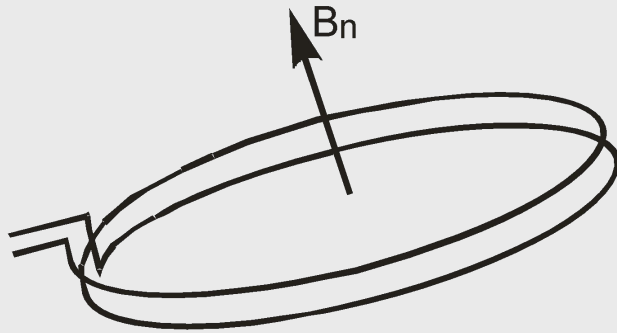
Бесконтактное измерение



Измерение переменного электрического поля с помощью незаземленной антенны. Поле обязательно переменное.

Измерение магнитного поля

Измерение переменного магнитного поля с помощью рамки (петли) .

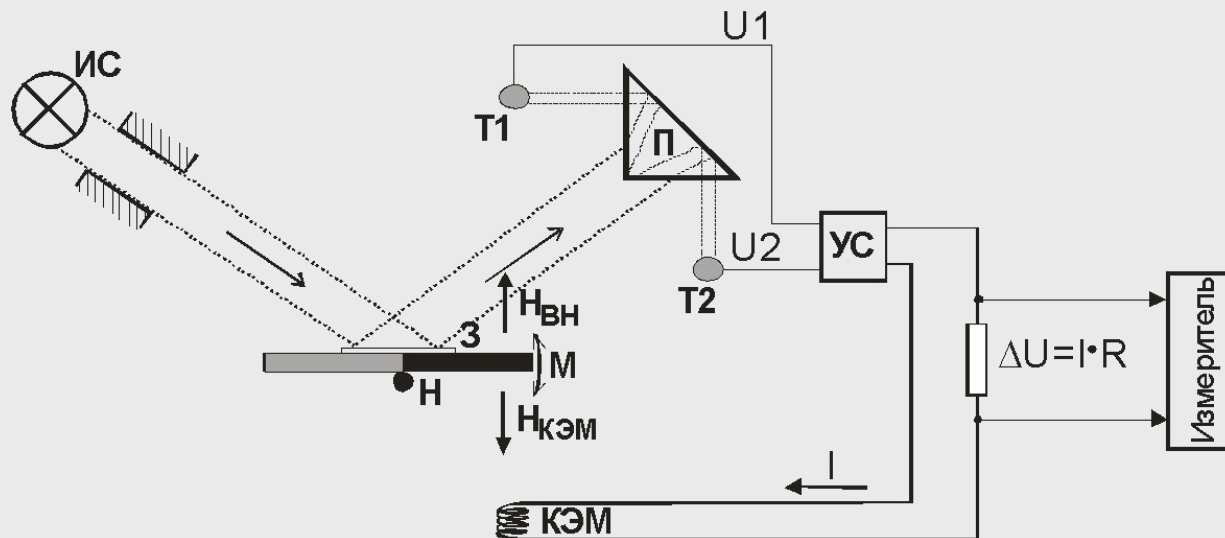


- 1 - ферромагнитный стержень
- 2 - обмотка
- 3 - корпус

Индукционный датчик для измерения переменного магнитного поля

Индукционный датчик можно сделать более компактным, чем рамку или петлю, т.к. чувствительность датчика возрастает за счет высокой магнитной проницаемости ферромагнитного сердечника.

Магнитометр



Условные обозначения:

ИС - источник света(светодиод)

М - магнит

Н - кварцевая нить

З - зеркало

Т1 - фототранзистор 1

Т2 - фототранзистор 2

П - призма

УС - устройство сравнения

КЭМ - компенсирующий электромагнит

$H_{ВН}$ - внешнее магнитное поле

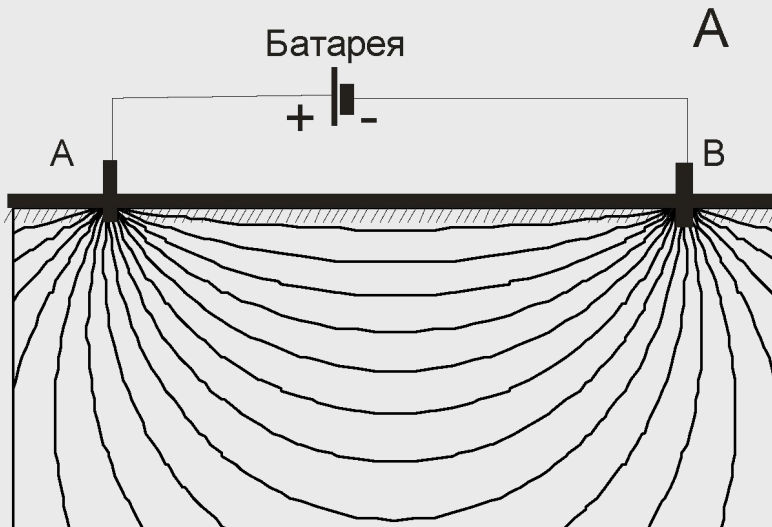
$H_{КЭМ}$ - магнитное поле компенсирующего электромагнита

Магнитометр позволяет измерять магнитные поля очень низкой частоты, т.е. меняющиеся медленно и очень медленно.

О создании искусственных полей

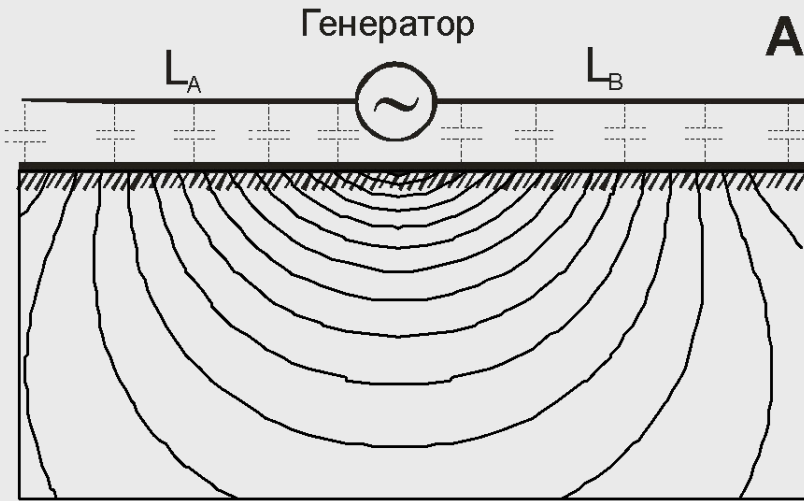
В электроразведке существуют методы в которых изучаются электрические или магнитные поля естественного происхождения, в других случаях такие поля создаются искусственно. Можно сделать искусственные источники преимущественно электрического поля, преимущественно магнитного, в ряде случаев источники возбуждают и электрическое и магнитное поле.

Самым простым источником электрического поля является заземленная линия. Если в линию пропускают постоянный ток, или ток низкой частоты, то она возбуждает в основном электрическое поле. По мере повышения частоты тока возрастает возбуждаемое магнитное поле.



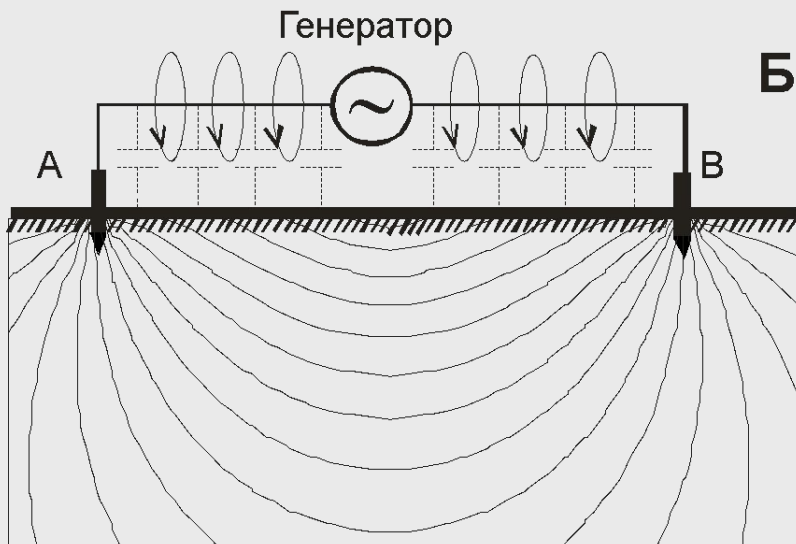
Возбуждение электрического поля на постоянном токе

Возбуждение электромагнитных полей в Земле



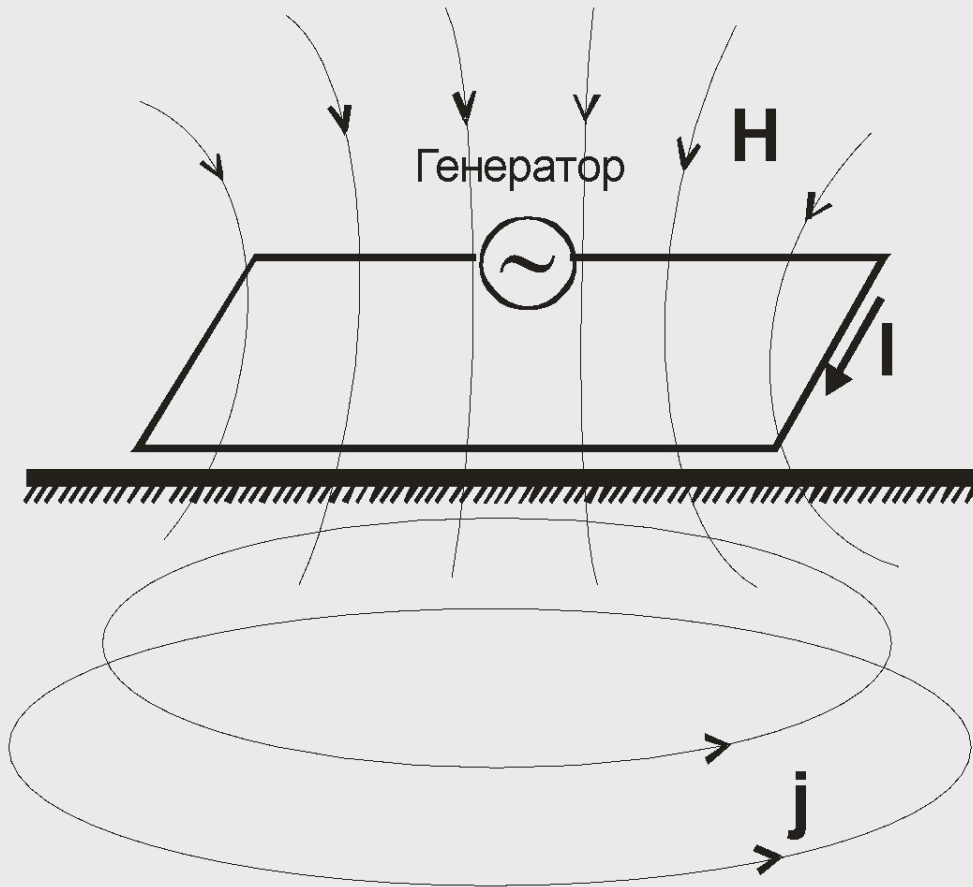
А

Способы возбуждения переменных электромагнитных полей в Земле: А - емкостной, Б - емкостной и индукционный (смешанный)



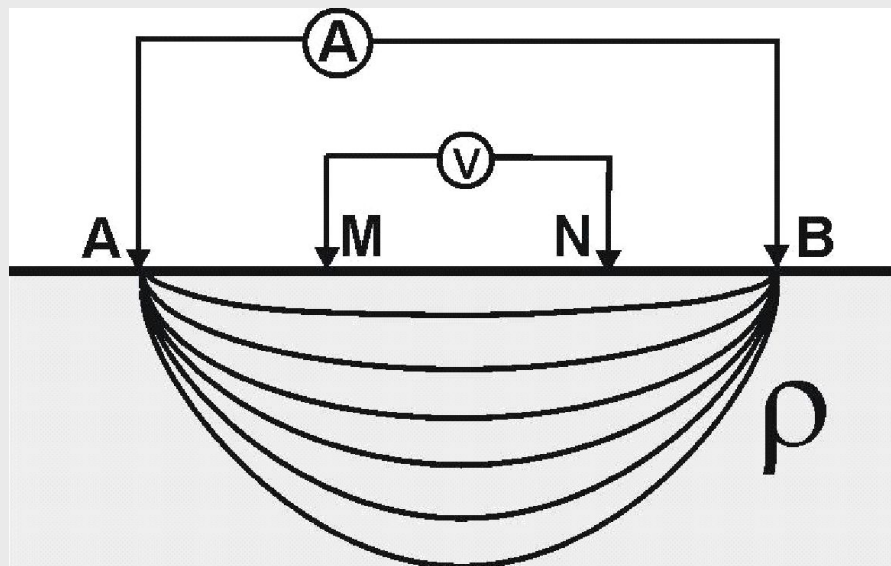
Б

Индукционное возбуждение полей



Индукционное возбуждение переменных электромагнитных полей в Земле. В земле таким способом возбуждаются и электрическое и магнитное поле.

Метод сопротивлений



Вход (ток)

$$J \rightarrow j \rightarrow j * \rho = E \rightarrow E * MN = dU$$

Выход
-(напряжение)

Шаг 1: плотность тока $j = \frac{I}{2\pi \cdot r^2}$

Шаг 2: закон Ома $E = j * \rho$

Шаг 3: Измеряемый сигнал $dU = E * MN$

Метод сопротивлений, 2

Отношение результата (dU) к причине (току I) дает величину сопротивления в Омах. Но в промежуточных шагах использовались расстояния между электродами, которые влияли на плотность тока и на пересчет электрического поля в напряжение. Эти расстояния учитывает геометрический коэффициент установки K .

$$\rho = K \frac{\Delta U_{MN}}{I_{AB}}$$

$$K = 2\pi / \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN} \right)$$

С помощью K вводится понятие кажущегося сопротивления. Предложили это братья Шлюмберже.

Кажущееся удельное сопротивление ρ_K – это наблюдаемое электрическое поле, нормированное по параметрам установки таким образом, чтобы в однородном полупространстве кажущееся сопротивление совпадало с истинным удельным сопротивлением. ρ_K приблизительно равно осредненному по некоторому объему удельному сопротивлению пород. Размерность Ом.м.

К какой области пространства относят это кажущееся сопротивление?

Первая схема, начало 20 в.

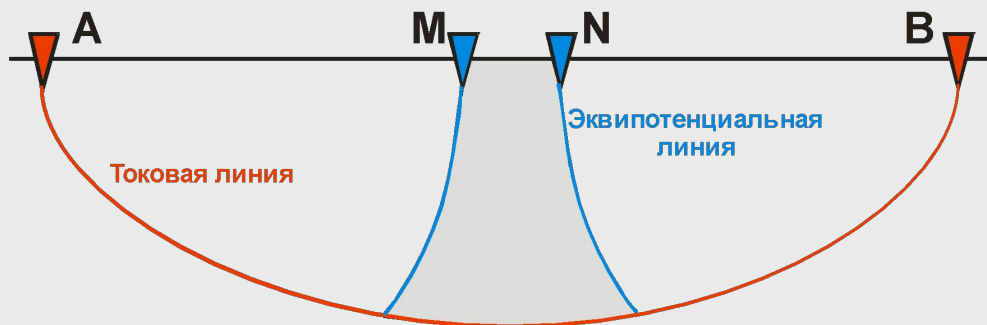
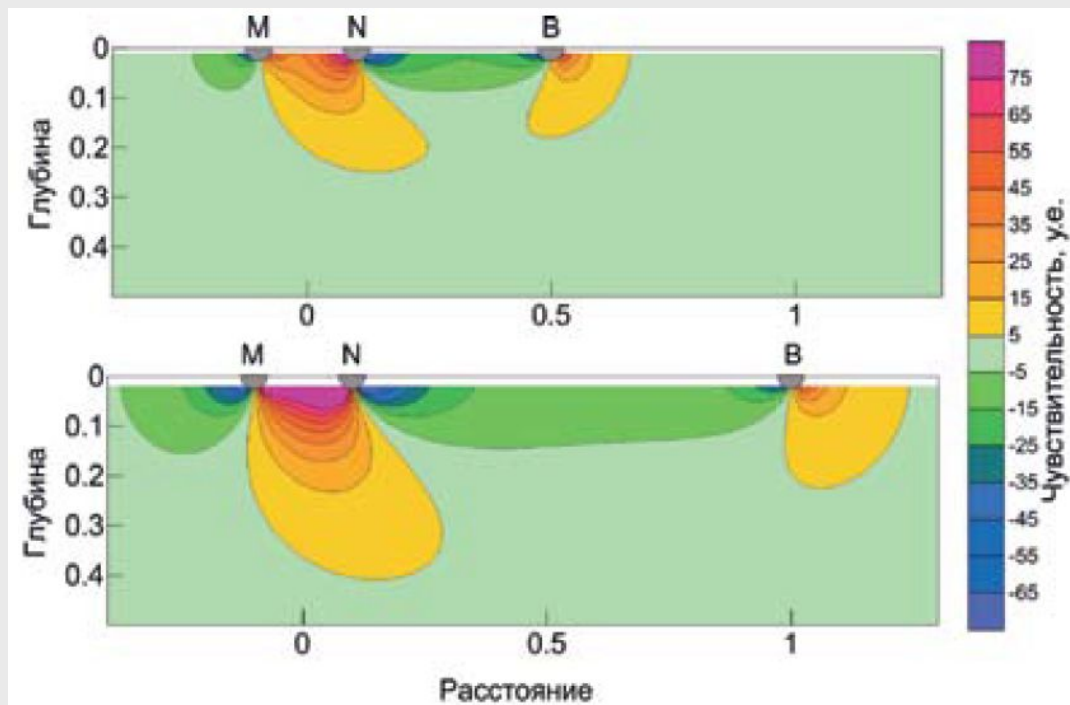


Схема через производные, Локе М.

$$Sens(x, z) = \frac{\partial \Delta U_{MN}}{\partial \rho(x, z)}$$

Производные дали важные уточнения: Влияния + и -, сильные и слабые, влияет тип установки и разнос, вблизи поверхности влияние сильнее, с глубиной убывает. Влияния не только в вертикальной плоскости, но и вокруг установки. Влияют объекты не только вблизи MN, но и вблизи A и B.



Классификация методов электроразведки

Первая классификация (по частоте тока)

Постоянный ток

На разных частотах поле или ток распространяются в проводящей среде по-разному, поэтому основные уравнения разные, и процессы, которые описывают уравнения э/р, различны.

Переменный ток

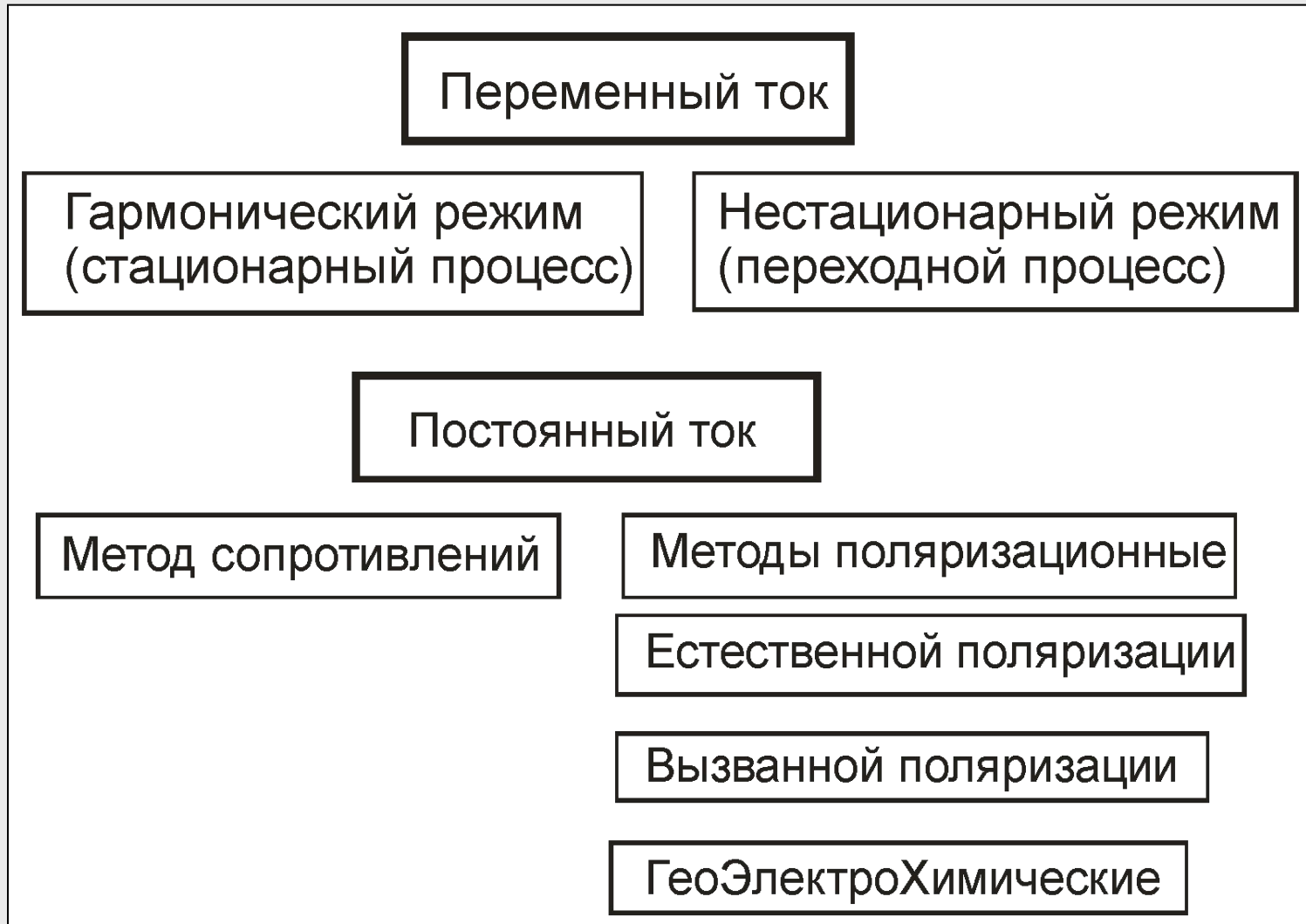
Очень низких частот
0.0001 Гц - 10 Гц

Низких частот
10 Гц - 10 МГц

Очень высоких частот
10 МГц - 2 ГГц

Пока недостатком этой классификации и ряда последующих схем является то, что нет конкретных примеров методов электроразведки для каждого класса. Пока это пустые клеточки. Их надо постепенно наполнять.

Варианты классификации для переменного и постоянного тока



Классификация по глубине изучения

1 см - 1 м

1 м - 10 м

10 м - 100 м

100 м - 1 км

1 км - 10 км

10 км - 100 км

Классификация по решаемым задачам

Археологическая э/р (глубины от см до метров)

Криминалистическая, военная э/р (просвечивание стен, полов, чемоданов, людей, автомашин и т.д.) (Глубины от см до метров)

Техническая э/р (искусственные сооружения и процессы в земле) (до 20 – 50 м)

Поиски стройматериалов (от 1 м до 100 м)

Поиски воды (от 1 м до 1 км)

Изыскания под строительство зданий, мостов, дорог, трубопроводов и ... (1-10 м)

Угольная электроразведка (до 1 км)

Рудная электроразведка (до 1 км)

Нерудная электроразведка (до 500 м)

Поиски и разведка месторождений нефти и газа (до 5 км)

Изучение тектоники, региональных структур, земной коры и мантии (до 100 км)

И это еще не все...

Классификация по технологиям изучения

Профилирование (вдоль линии профиля), как канаву копаем

Зондирование (на глубину), как будто бурим скважину все глубже

Картирование (площади)

Просвечивание (между скважинами или выработками под землей)

Азимутальные наблюдения (вращение)

Классификация по средам изучения

На поверхности земли (наземные методы)

С воздуха (аэрометоды)

С поверхности воды, со дна (акваторные методы)

В скважинах, из скважин, между скважинами

Подземные методы (между шахтами и горными выработками)

Классификация по принципам зондирования

Термин Зондирование - означает изучение разреза от поверхности земли на глубину, как бурение.

Зондирование геометрическое (чем дальше друг от друга источник и приемник, тем глубже проникает поле)

Зондирование частотное (низкие частоты проникают глубже)

Зондирование временем (чем больше прошло времени с момента возбуждения, тем глубже прошел сигнал)

Часто зондирование осуществляется при смещении этих принципов

Страницы истории электроразведки

Роберт Фокс

Первая важная работа по электроразведке выполнена англичанином Робертом Фоксом (1789 - 1877), который, обладал знаниями геологии, изучал температуру Земли, электричество и земной магнетизм и считается дедушкой геофизики. В шахтах Корнуолла он наблюдал существование естественных электрических токов, вызванных наличием сульфидных жил. В 1833, он сконструировал первый потенциометр, используя мостовую схему. В его бумагах была найдена следующая запись: «Кажется вероятным, что электромагнетизм окажется полезным в практике горного дела, давая с некоторой степенью вероятности относительное количество руды в жиле, и направление в земле к наибольшей концентрации руды.»

Robert Were Fox the Younger



Robert Were Fox

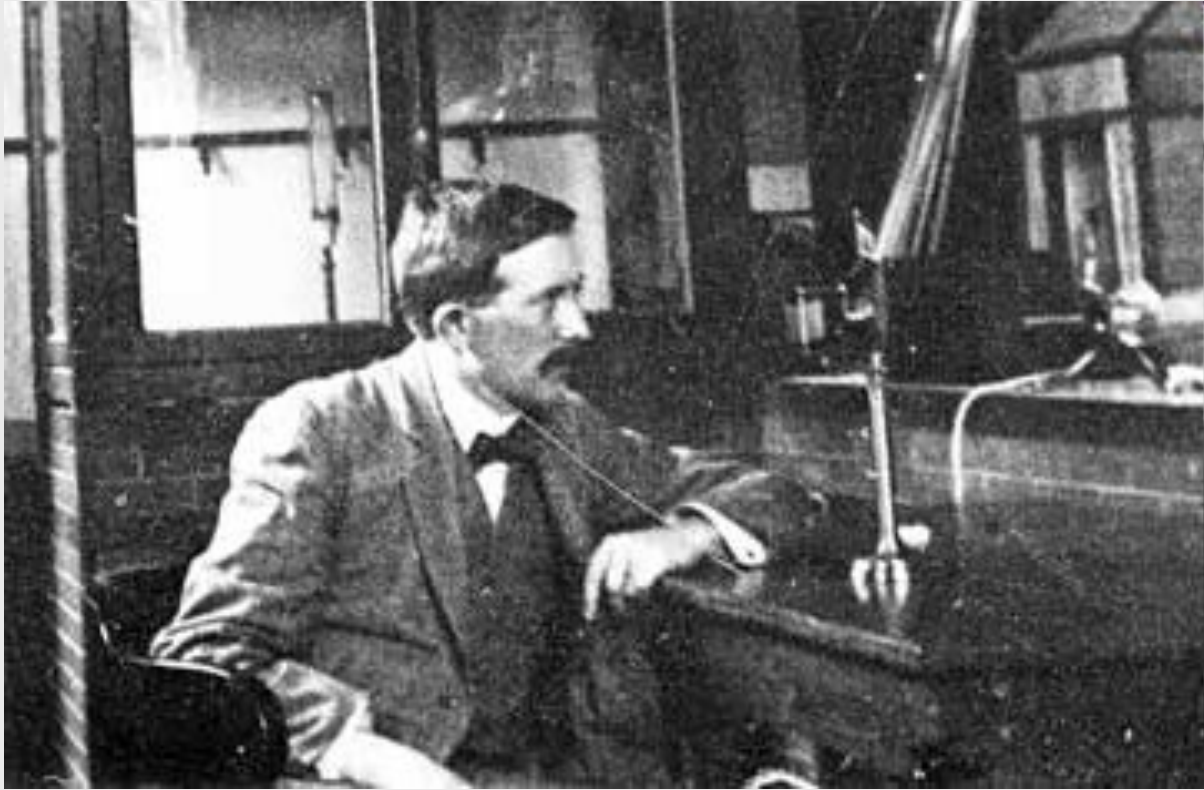
Конрад и Марсель Шлюмберже

Но общепризнанным уже не дедушкой, а отцом электроразведки считается французский инженер Конрад Шлюмберже.

Конрад (1878) и его брат Марсель (1884) Шлюмберже родились в Эльзасе, который в то время принадлежал Германии. Родители-французы послали их учиться в Париж, Конрад стал физиком, а Марсель инженером. С 1912 г. Конрад стал профессором Горной школы в Париже. С 1912 по 1920 гг. он придумал и запатентовал 4 метода электроразведки: вертикальное электрическое зондирование - ВЭЗ, электропрофилирование - ЭП, метод естественного электрического поля - ЕП и вызванной поляризации - ВП. За которыми последовали электрический каротаж скважин и метод теллурических токов. То есть **всего 6 разных методов**.

Отец Конрада и Марселя, Поль Шлюмберже (текстильный магнат), 1919 год: «Я выделяю моим сыновьям, Конраду и Марселю, сумму, необходимую для научных исследований по природе строения Земли, в количестве пятисот тысяч франков... Они должны посвятить себя целиком своим научным работам. Научный интерес должен превалировать над коммерческим»

К. Шлюмберже



Слева - Конрад Шлюмберже в период его работы в Горной школе в Париже. Справа - дружеский шарж на профессора, сделанный одним из студентов.



К. Шлюмберже



На фото Конрад Шлюмберже в 1912 г. в Нормандии проводит опыты по электроразведке используя головные телефоны как индикатор сигнала.

Он открыл в 1913 году рудное тело сульфидов в местности Бор в Сербии с помощью метода естественной поляризации, первое геофизическое открытие немагнитной руды.

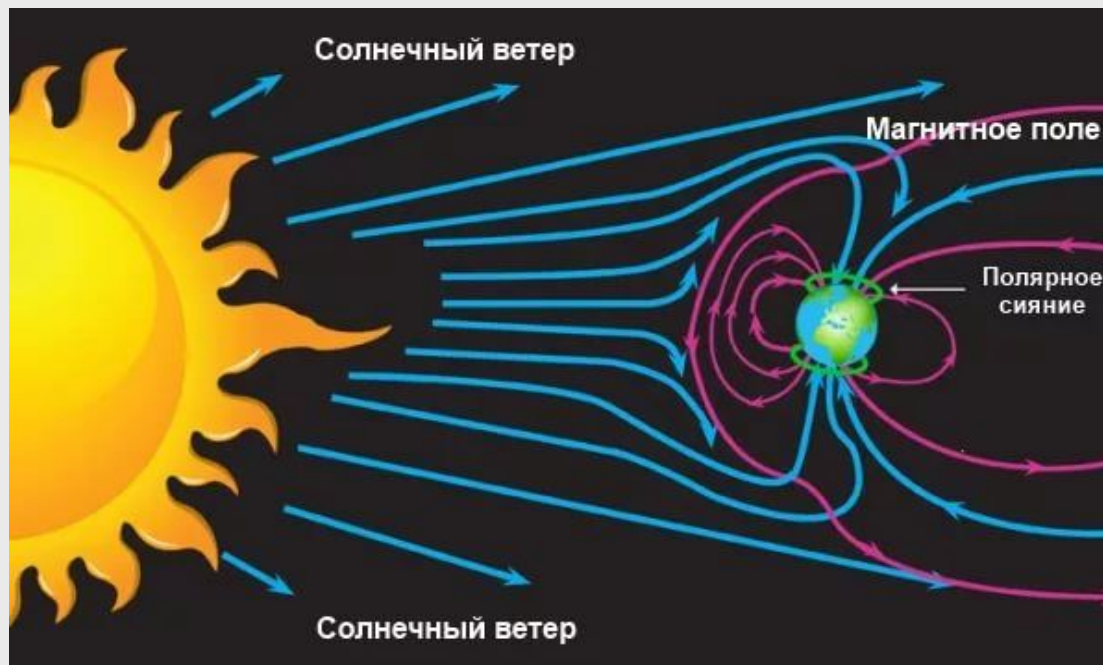
В 1912 - 1914 гг. он создал и практически опробовал метод вертикальных электрических зондирований (ВЭЗ). С помощью ВЭЗ была обнаружена нефтяная купольная структура Арицести в Румынии в 1923.

К. Шлюмберже

Одним из важных качеств Конрада Шлюмберже было осознание того, что его методы не смогут развиваться, без создания прочной теоретической базы, которая смогла бы помочь применению геоэлектрических методов. Вместе со своим братом Марселем, румынским математиком Саввой Стефанеску, французским физиком Раймоном Майе, а также Мартэном, Леонардоном, Польдини, Доллом, он, начиная с 1925, атаковал трудные математические задачи о распространении постоянного электрического тока в слоистых средах, изотропных и анизотропных. Одновременно развивались основы интерпретации (Майе, Стефанеску и Костицын). К сожалению, важные результаты, которые получили эти исследователи, и которые позволяли рассчитывать глубину слоев, не были известны детально, а только в неполном виде. Эта политика засекречивания, коммерческая в своей основе, принесла большой вред электроразведке, и привела к тому, что ее возможности долго оставались неизвестными и неиспользованными. Начиная с 1928, по инициативе Д.В. Голубовникова, компанию Шлюмберже начали контрактовать для нефтяной разведки в России. При заключении контрактов французы стремились выполнить всю работу сами, а русские настаивали на совместной работе французов с советскими специалистами. Французам пришлось согласиться на совместную работу.

И хотя были получены заметные успехи в районе Грозного, более важным результатом этих работ было не обнаружение нефти, а ассимиляция (восприятие) русскими геофизиками методов и идей французских ученых. С группой Шлюмберже работали В.Н.Дахнов, А.С.Семенов, С.Г.Комаров - в дальнейшем - известные советские ученые. Летом 1929 г. А.И. Заборовский выполнил электроразведочные работы методом сопротивлений в районе Грозного с целью поиска и исследования нефтеносных структур. Эти работы выполнялись параллельно с работами фирмы Шлюмберже и были настолько успешными, что фирма была вынуждена признать, что ее секреты перестали быть таковыми. В этом смысле советские геофизики смогли независимо пройти дорогу открытую вначале Шлюмберже, и прошли гораздо дальше. Конрад приезжал в СССР три раза: в 1931, 1933 и 1936 гг., и умер от инфаркта в 1936 г. в Стокгольме, в Швеции, сразу после возвращения из поездки в Советский Союз. Формальным поводом для разрыва отношений с Шлюмберже в 1937 году стал ущерб, якобы нанесенный французами советским интересам. А по сути, обе стороны больше не нуждались друг в друге. Фирма получила грандиозный опыт, который позволил ей выйти на американский рынок и начать работу в других странах. А советские специалисты досконально освоили **методику и приборы Шлюмберже**, которые начали выпускать в СССР без упоминания об их изобретателе. Прибор ЭП-1 выпускали в СССР в течение 30 лет. В 1937 г. сотрудники фирмы были обвинены в СССР в шпионаже. Тех, кто обладал французским гражданством, выслали из страны, остальных арестовали.

Электроразведка естественными переменными электромагнитными полями



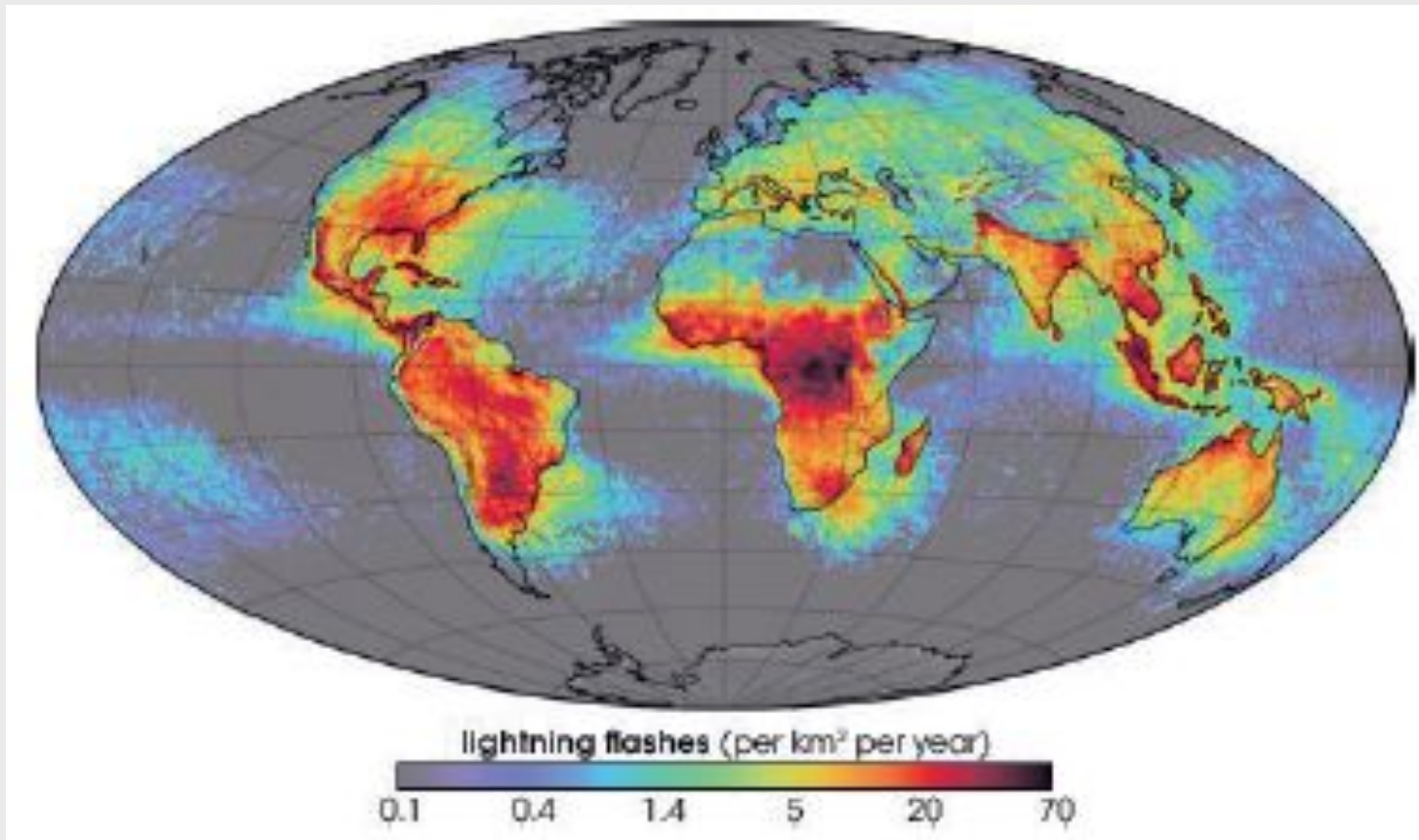
Происхождение полей

Естественное переменное электромагнитное поле может возникнуть под влиянием возбуждения ионосферы земли "солнечным ветром" - потоком заряженных частиц, летящих от солнца. "Солнечный ветер" имеет периоды колебаний МТ поля 1 сек - 1000 сек и глубины 1 км - сотни км. Поле от грозовой активности в атмосфере земли имеет частоты 10 Гц до 10 кГц (или периоды 0.1 сек - 0.0001 сек) и глубины (10 м - 1 км). .

На бытовом уровне мы считаем грозой электрические разряды вблизи наблюдателя, в геофизическом смысле грозовые разряды происходят почти непрерывно, если рассматривать как ближние, так и дальние электрические разряды. Каждую секунду на Земле происходит до 100 разрядов молний.

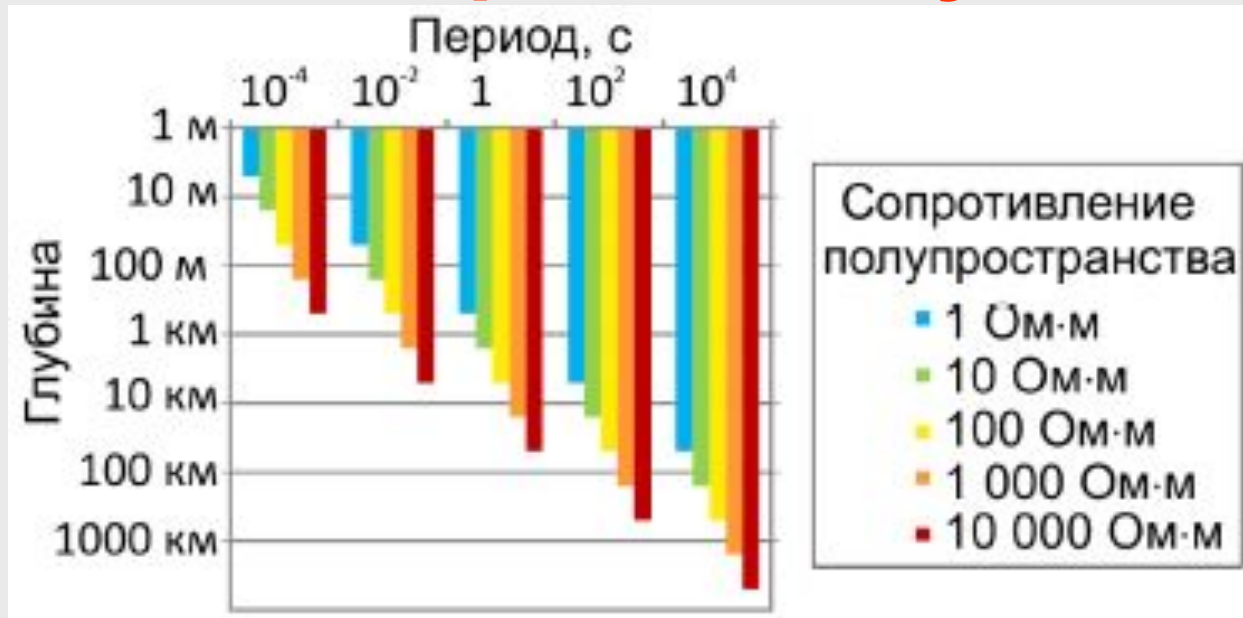
Эти поля используют такие методы электроразведка как метод теллурических токов МТТ, магнитотеллурическое профилирование МТП и зондирование МТЗ, поле грозových разрядов использует метод АМТЗ (аудио магнитотеллурическое зондирование) и некоторые другие.

Грозы на Земле



Распределение гроз по данным НАСА. Максимум в экваториальной зоне. Каждую секунду до 50-100 разрядов.

МТ периоды, глубины, среды



Существующие на сегодняшний день модификации МТ методов позволяют проводить исследования в очень широком диапазоне глубин – **от десятков метров до сотен километров**. Так было не всегда. Периоды МТ поля 1 сек - 1000 сек связаны с "солнечным ветром" (глубины 1 км - сотни км), периоды от 10 Гц до 10 кГц (0.1 сек - 0.0001 сек) связаны с грозовой активностью (10 м - 1 км). Чем меньше частота колебаний поля (больше период), тем глубже поле проникает в землю. Кроме того, толщина скин-слоя определяется сопротивлением. В высокоомной среде поле затухает с глубиной медленнее, чем в проводящей, поэтому глубина изучения больше.

Метод теллурических токов (МТТ)

МТТ - самый старый из МТ группы, известен со второй половины 19 века. Метод был официально предложен в 30-х гг. 20 века К.Шлюмберже. Измеряются только электрические компоненты МТ поля. Поэтому результаты получаются не количественными, а качественными, в виде различия значений на рядовой точке и (q) на базовой (неподвижной) точке (p). Вычисляют теллурупараметр $K = E_q / E_p$. Регистрация поля теллурических токов позволяет определять относительное значение суммарной продольной проводимости надпорной толщи **S** (отношение глубины до фундамента к сопротивлению осадочного чехла над фундаментом) в долях этого обобщенного параметра разреза на опорной точке.

С началом измерений магнитного поля вместе с электрическим и цифровой регистрацией МТ поля роль МТТ сильно снизилась. Сейчас практически не применяется.

Магнитотеллурическое профилирование (МТП)

Метод пришел на смену МТТ. Регистрация магнитной компоненты вместе с электрической позволила рассчитывать импеданс и кажущееся сопротивление, в ряде случаев значение суммарной продольной проводимости S (отношение глубины до фундамента к сопротивлению осадочного чехла над фундаментом) уже не относительное, а абсолютное. Развитие аппаратуры (цифровая регистрация поля) и алгоритмов обработки привело к вытеснению метода МТП методом МТЗ.

Магнитотеллурическое зондирование (МТЗ)

Метод МТЗ стал очень популярным и используется для решения многих задач. Достигнуто это трудом очень многих ученых: теоретиков, аппаратурщиков, специалистов по программному обеспечению. Два источника - **солнечный ветер и грозовая активность**, первая - низкочастотная (длиннопериодная), более глубинная (МТЗ), вторая высокочастотная (с более короткими периодами) с меньшей глубиной (АМТЗ). Есть еще метод ГМТЗ (наиболее глубинный) - это уже за пределами разведочной геофизики, чисто академические исследования Земли как планеты.

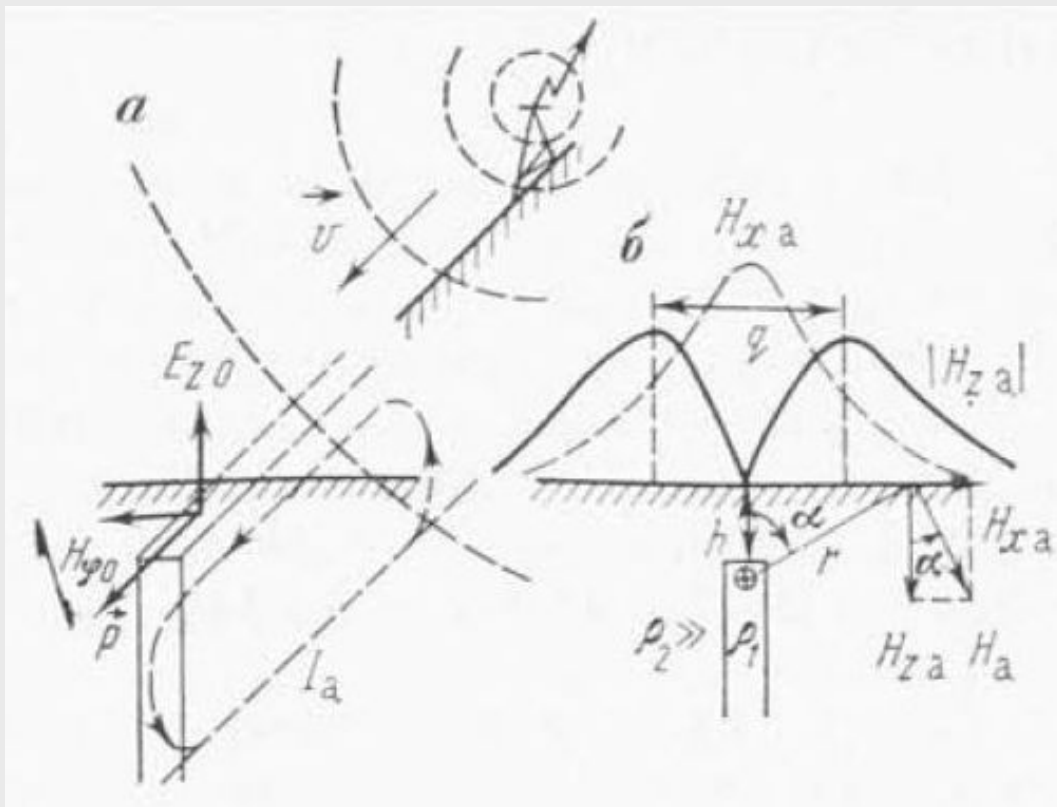
Метод переменного естественного электрического поля (ПЕЭП)

Метод ПЕЭП использует диапазон частот 8 - 300 Гц. Основным источником - грозовая активность. Для большей устойчивости измерений проводится накопление и осреднение показаний. Напряженность электрического поля изменяется от сотых долей до единиц микровольт на метр, а напряженность магнитного поля составляет 10^{-3} - 10^{-4} мА/м. Расчет импеданса позволяет перейти к кажущемуся сопротивлению. Время расцвета 70-е годы 20 века.

Метод СДВР

Электромагнитные поля радиостанций в волноводе "земля—ионосфера" распространяются на огромные расстояния (100 - 10 000 км). Параметры этих полей в значительной мере определяются особенностями геоэлектрического разреза в точке наблюдения, что явилось предпосылкой для создания электроразведочного метода радиокип (метода радиокомпарацин и пеленгации), использующего поля длинноволновых (120—450 кГц) радиовещательных станций и метода СДВР для сверхдлинноволновых (10—25 кГц) радиостанций морской навигации и связи. Радиостанции не очень удобны, они иногда работают, иногда нет, амплитудная модуляция (громче - тише) создает свои проблемы. Сверхдлинноволновые радиостанции работают без перерывов, их сигналы очень стабильны, это удобно. В дальней зоне поле радиостанции можно рассматривать как плоскую электромагнитную волну, поляризованную в плоскости, перпендикулярной к направлению распространения волны, таким образом, что вектор E почти вертикален, а вектор H горизонтален. Измерение обеих составляющих поля (E - электрической и H - магнитной) позволяет находить импеданс $|Z| = |E_r|/|H_\phi|$ и рассчитывать эффективное сопротивление разреза. В высокоомных ($\rho > 1000$ Ом.м) разрезах глубина разведки до 100 м, в низкоомных ($\rho = 10 - 20$ Ом.м) разрезах глубина разведки мала (около 10 - 20 м).

Поле радиостанции и проводник



Проводящая залежь в поле дальней радиостанции: а - направление первичного поля и распространения волны: б — графики вертикальной (H_{za}) и горизонтальной (H_{xa}) составляющих вторичного поля.

Работы ведут в масштабах от 1:50 000 до 1:10 000. Измеряют обычно H_z и только при детализации аномалий дополнительно измеряют горизонтальную составляющую H_ϕ или горизонтальную составляющую электрического поля E_ϕ . В районах с маломощными покровными отложениями и спокойным рельефом этот метод обладает существенным преимуществом перед другими методами электроразведки (дешевизна и высокая производительность полевых работ).

Электромагнитное излучение (ЭМИ) горных пород

Горные породы при трещинообразовании излучают ЭМ волны в широком диапазоне частот (10 Гц до 70 кГц) . Природа этого явления связана с перемещением дислокаций, несущих электрические заряды в поле высоких механических напряжений. Другим источником излучения являются экзоэлектроны (тепловые электроны), вылетающие из материала через свежеобразованные поверхности трещин. Этот эффект используется в ряде областей науки и техники. Интенсивность излучения может меняться в шахтах и горных выработках в пределах рабочей смены, больше при взрывных работах, после них снижается. Амплитуда сигналов ЭМИ позволяет оперативно следить за горным давлением на каждом участке рудника. Показания увеличиваются на участках, где возможно обрушение призабойной массы. Выпускаются приборы для измерения ЭМИ, например, ИЭМИ-1. Есть опыт длительного контроля ЭМИ на ряде рудников. Если фон регистрируемого электромагнитного излучения ниже критического и остается стабильным, то опасность обрушения отсутствует. При резком возрастании интенсивности излучения, что является следствием мгновенного трещинообразования, прибор выдает световые и звуковые сигналы. Регистрация ЭМИ позволяет отслеживать изменения напряженного состояния приконтурной зоны горных выработок, фиксировать его увеличение при отработке удароопасных участков.