

# Общий курс электроразведки

Доцент Бобачев Алексей Анатольевич  
bobachev@rambler.ru

Лекция подготовлена профессором МГУ Шевниным Владимиром Алексеевичем

# Разнообразии видов деятельности внутри электроразведки

В ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКЕ, как и в других методах геофизики измеряют ПОЛЕ. Эти измерения делают с помощью ПРИБОРОВ, и по определенной МЕТОДИКЕ. Поле отражает распределение в земле физических СВОЙСТВ (в данном случае электрических свойств). Чтобы по измеренному полю судить о распределении свойств нужно опираться на ТЕОРИЮ метода электроразведки, которая для удобства практического применения реализована в виде АЛГОРИТМОВ и ПРОГРАММ ПРЯМЫХ и ОБРАТНЫХ задач. Электрические свойства это внутреннее дело электроразведки. При решении практических геологических задач надо дать ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ РЕЗУЛЬТАТ, для получения которого приходится переходить от электрических свойств к геологическим свойствам или характеристикам (руда или не руда, нефть или газ, песок, глина, вода (пресная или минерализованная), древние остатки зданий и сооружений и т.д.). Самое трудное – дать геологический результат, до этого мы варимся в собственном соку (внутри электроразведки), на своей кухне, а с геологическим результатом мы выходим к людям и, прежде всего, к заказчикам работы, которым не очень хочется платить деньги за работу, которая их не удовлетворяет, не дает ожидаемого, не обеспечивает качества. Значит, надо давать качественный результат.

# Проблема выбора

Среди методов геофизики и геофизических технологий есть неофициальное деление на малобюджетные и дорогостоящие работы. Чаще всего дорого стоят: сейсморазведка, промысловая (скважинная) геофизика, аэрогеофизика, морские геофизические работы. Это как бы большие заводы, там трудится множество людей, нужно было вложить много денег в организацию (скважины, корабли, самолеты), и в таких работах действует разделение труда, узкая специализация (отдельные специалисты или цеха завода).

В электроразведке (малобюджетной) приходится делать много разных видов работ одним и тем же людям, полевые партии маленькие, а работа разнообразная: надо рубить просеки, размечать профили, делать топографию, потом геофизические измерения, выбрать для этого методику, и применяя правильно работающую аппаратуру, их обработку, интерпретацию, получать геологические результаты и проводить их заверку.

Сравните большой автомобильный завод и маленькую швейную мастерскую. Но человеку в его жизни нужен и автомобиль и одежда, нужны большие заводы и маленькие мастерские.

Люди выбирают себе работу по своим возможностям и желаниям. Одним хочется работать на большом заводе, другим все делать своими руками.

# Многообразии вариантов электроразведки

В магниторазведке и гравиразведке изучают естественные поля Земли. Эти поля уже **созданы природой**. В электроразведке существует множество вариантов, которые можно называть отдельными методами или модификациями (несколько десятков, как минимум). **Физические свойства**: (их 5 вместо одного в гравике): сопротивление, естественная и вызванная поляризация, диэлектрическая и магнитная проницаемость.

Поле может быть естественного происхождения, или искусственного, когда мы сами загоняем в землю ток от какого либо источника (генератора), создаем поле и измеряем его. Можно проводить измерения на постоянном токе (нулевой частоте) или на переменном токе очень разных частот. Поле может быть стационарное или нестационарное (меняющееся во времени).

Возбуждать поле и измерять можно контактно (забивая в землю электроды) или бесконтактно (с помощью рамок, петель, антенн). Контактные измерения как правило выполняются дискретно (забили, измерили, перешли на новое место измерения). Бесконтактные измерения могут выполняться дискретно или непрерывно (в движении - с автомашины, самолета, лодки). Чтобы как то систематизировать это разнообразие используют классификации 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

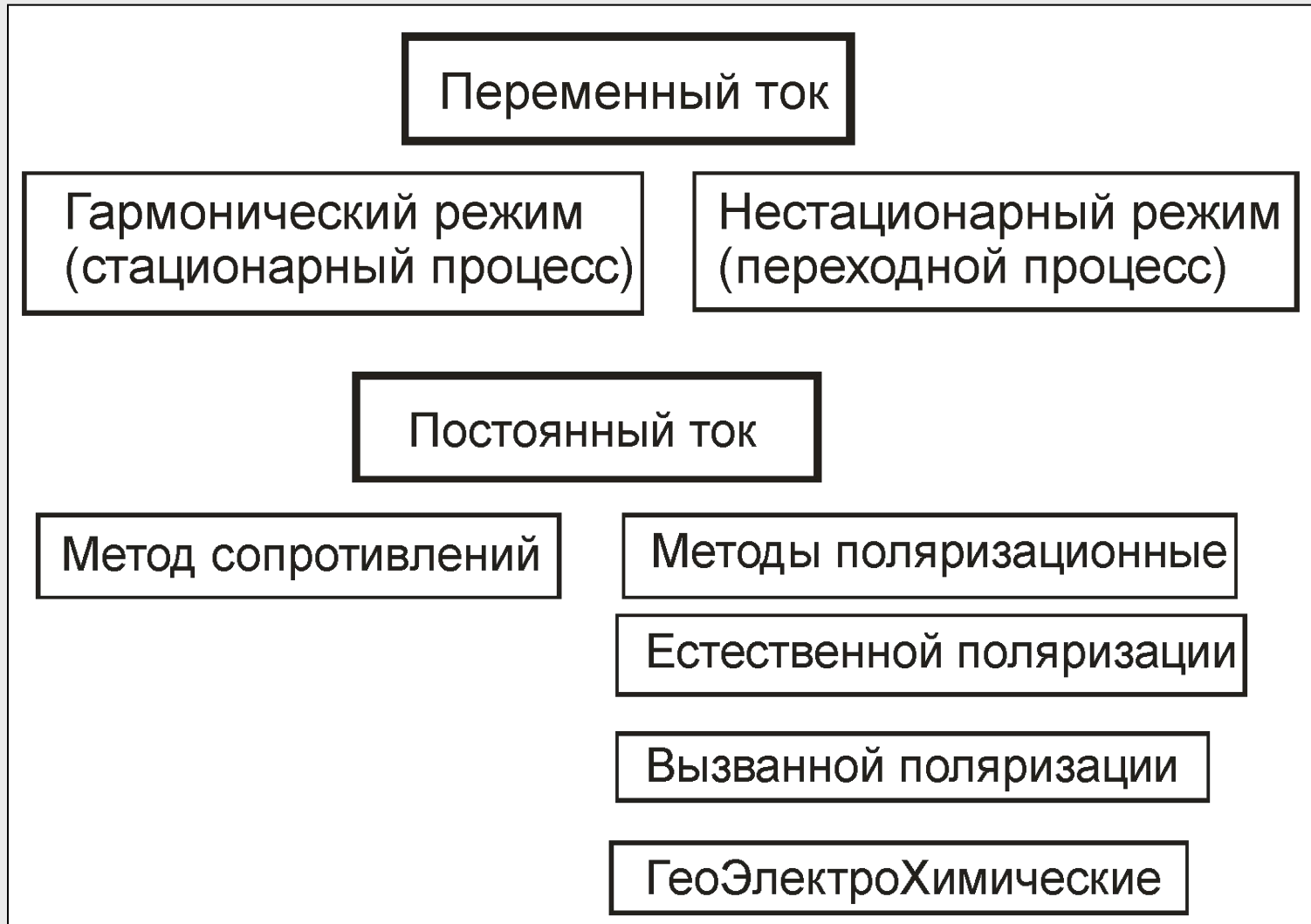
Очень низких частот  
0.0001 Гц - 10 Гц

Низких частот  
10 Гц - 10 МГц

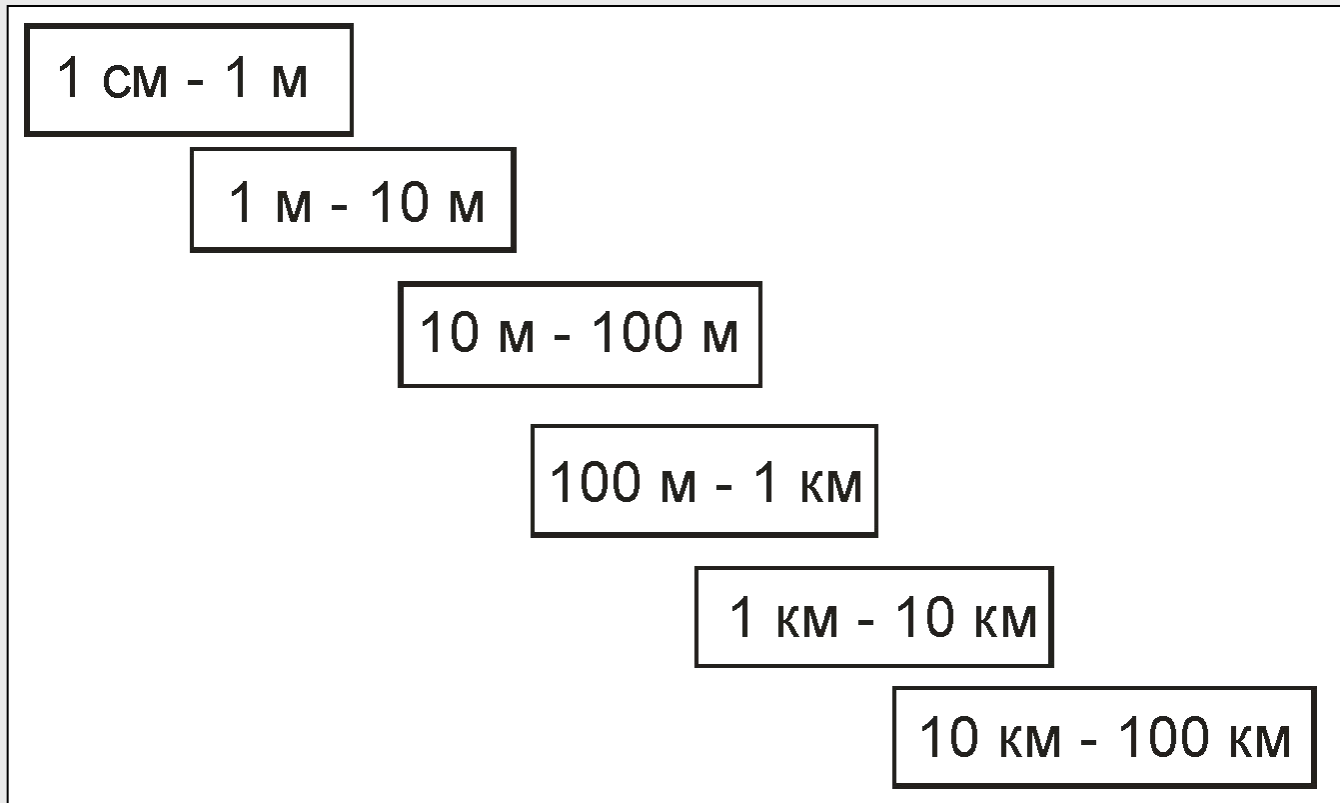
Очень высоких частот  
10 МГц - 2 ГГц

Пока недостатком этой классификации и последующих является то, что нет конкретных примеров методов электроразведки для каждого класса. После этого семестра я с вас буду спрашивать не пустые клеточки, а с наполнением методами. Нельзя спросить то, что нам не объясняли, скажете вы. Будем наполнять вместе.

# Варианты классификации для переменного и постоянного тока



# Классификация по глубине изучения



Какую цель можно ставить, давая так много «пустых» классификаций?

1. Все эти классификации хотелось бы наполнить живыми примерами
2. Каждый из вас может предложить свою классификацию. Если трудно запомнить предлагаемые, сделайте свою, но наполните ее примерами.

# 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 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)



# Классификация по технологиям изучения

Профилирование (вдоль линии профиля)

Зондирование (на глубину)

Картирование (площади)

Просвечивание (между скважинами или выработками под землей)

Азимутальные наблюдения (вращение)

# Классификация по средам изучения

На поверхности земли (наземные методы)

С воздуха (аэрогеофизика)

С поверхности воды, со дна (акваторная и морская геофизика)

В скважинах, из скважин, между скважинами

Подземные методы (между шахтами и горными выработками)

# Классификация по принципам зондирования

Зондирование геометрическое (чем дальше друг от друга источник и приемник, тем больше и глубже область влияющая на измеряемое поле)  
(Тем глубже проникает электрический ток)

Зондирование частотное (низкие частоты слабее затухают и проникают глубже)

Зондирование временем (чем больше прошло времени, тем с большей глубины пришел сигнал)

Часто зондирование осуществляется при смещении этих принципов

# Немного истории

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.»

С таким же правом можно считать первым русским геофизиком М.В.Ломоносова (1711 - 1765). Он жил раньше Фокса. Есть такая точка зрения.

Robert Were Fox the Younger



*Robert Were Fox*

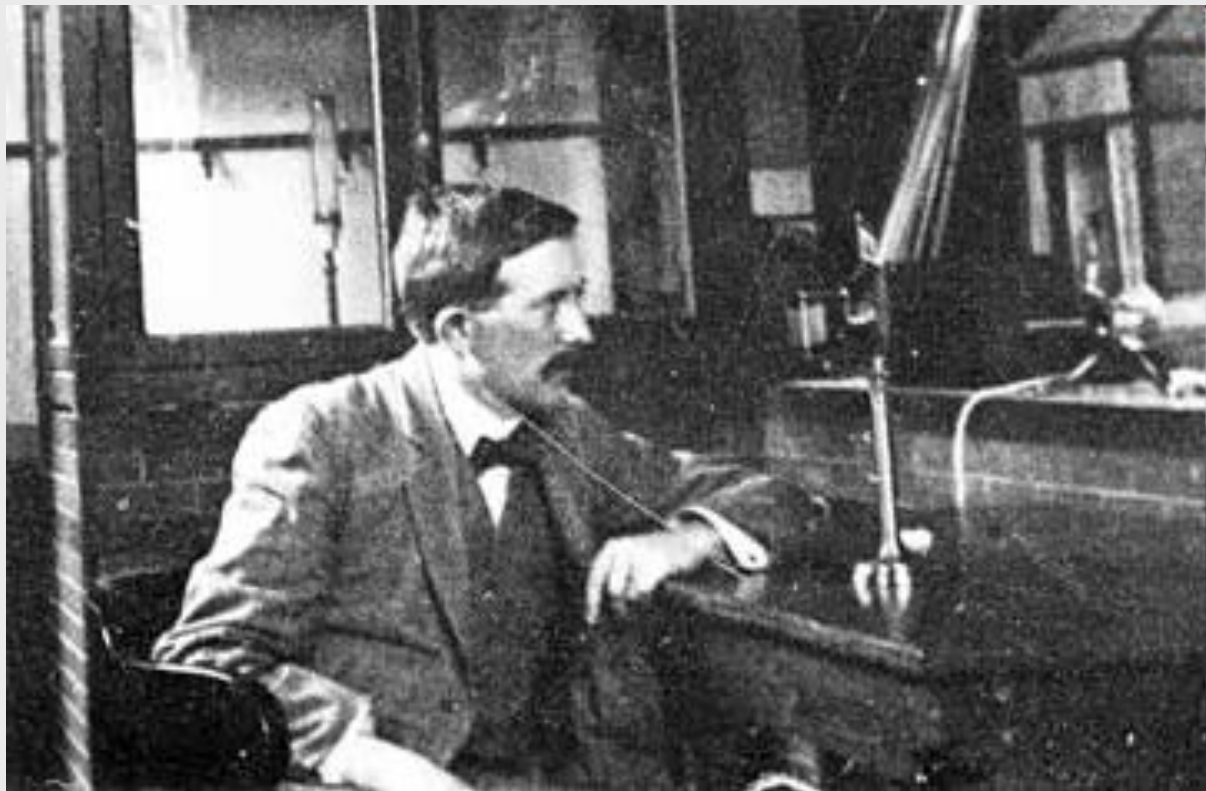
# Начало

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



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

(26)



# 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 (каждая фамилия заслуживает отдельного рассказа), 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-м г. сотрудники фирмы были обвинены в СССР в шпионаже. Тех, кто обладал французским гражданством, выслали из страны, остальных арестовали.



# В заключение

Это была краткая история контакта геофизиков Франции и России. А ведь геофизика в России имеет и свою собственную историю. Некоторые начинают ее с Ломоносова, другие с Бахметьева и Рагозина, с Петровского, Заборовского, Бурсиана. Был период развития до 1941 года, военный период, послевоенный. Вы будете изучать различные методы электроразведки и за каждым методом стояли люди, которые отдавали свои силы, энергию, интеллект развитию геофизики. Метод ЭП - И.М.Блох, ВП - В.А.Комаров, ЕП - А.С.Семенов, геоэлектрохимия - Ю.С.Рысс, ЗСБ - В.А.Сидоров, МТЗ - М.Н.Бердичевский, инженерная геофизика - А.А.Огильви.

Когда вы изучали историю разных стран, то эта история всегда была связана с людьми, ее творившими: Петр I, Степан Разин и Емельян Пугачев, Сталин и Жуков, Горбачев и Ельцин, Ч.Дарвин и Д.Максвелл, М.Фарадей и Тур Хейердал, С.П.Королев и Ю.Гагарин. Залогом вашего успеха в геофизике будет знание не только фактов, основ теории, приемов обработки и интерпретации, приборов, но и людей, творивших и продолжающих творить эту науку. Лекции дают вам лишь ориентировку, скелет науки. Чтобы превратить его в живую науку, нужно приложить свой собственный труд. Известна фраза Ньютона: Я сумел достигнуть многого в науке, потому что стоял на плечах гигантов. Чтобы идти вперед, нужно знать, что сделано до вас.

# Электроразведка в России

1. Братья Шлюмберже в 30-х годах работали в России и воспитали целую плеяду уже российских электроразведчиков (С.Г.Комаров, В.Н.Дахнов и др.), это была эпоха становления методов постоянного тока.

2. Послевоенный период (1945-1960) – развитие и широкое применение методов постоянного тока вплоть до кризиса и появления методов переменного тока

А.М.Пылаев, чьи номограммы эквивалентности признаны во всех странах, а были еще палетки А.М.Пылаева. Л.М.Альпин предложил дипольные зондирования.

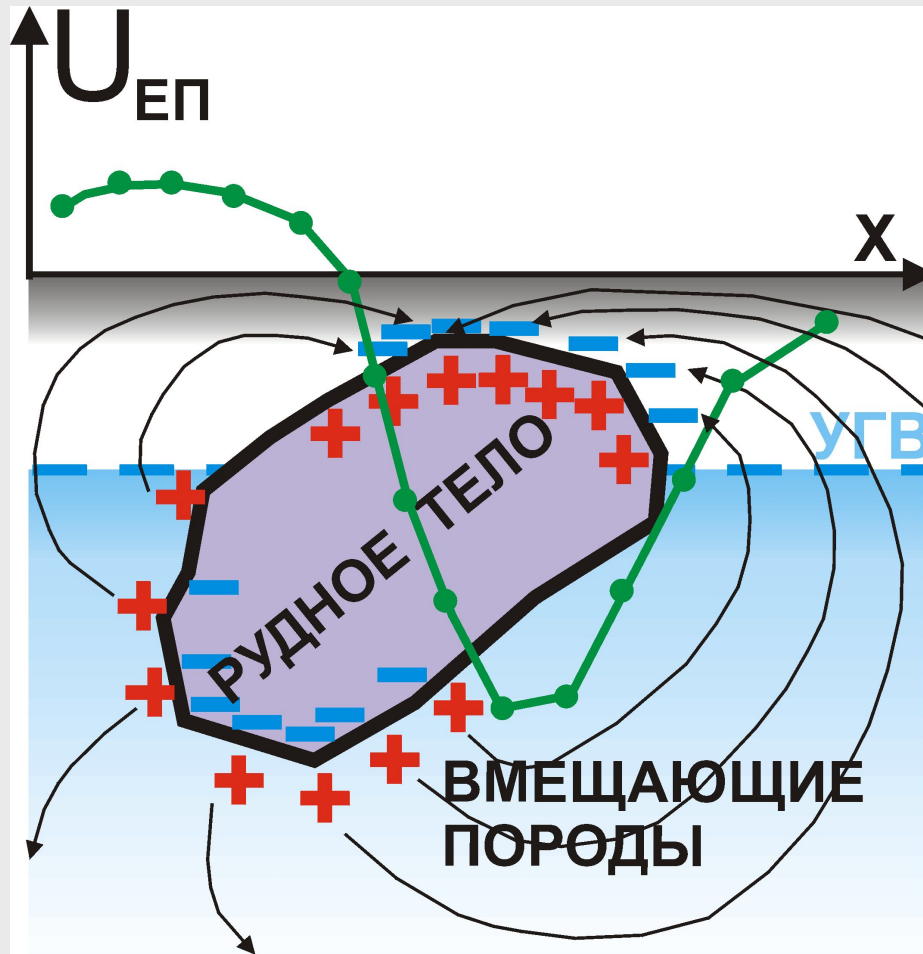
3. Эпоха ускоренного развития методов зондирований на переменном токе – МТЗ, ЧЗ, ЗС на нефть и газ. (50-е – 60-е годы)

4. 70-е годы расцвет рудной электроразведки (метод ВП, МПП, геоэлектрохимия). Комаров В.А., А.Б.Великин, Ю.С.Рысс. Появление метода ЗСБ (Сидоров В.А.). Начало решения 2D задач э/р на компьютерах.

# Электроразведка в России, 2

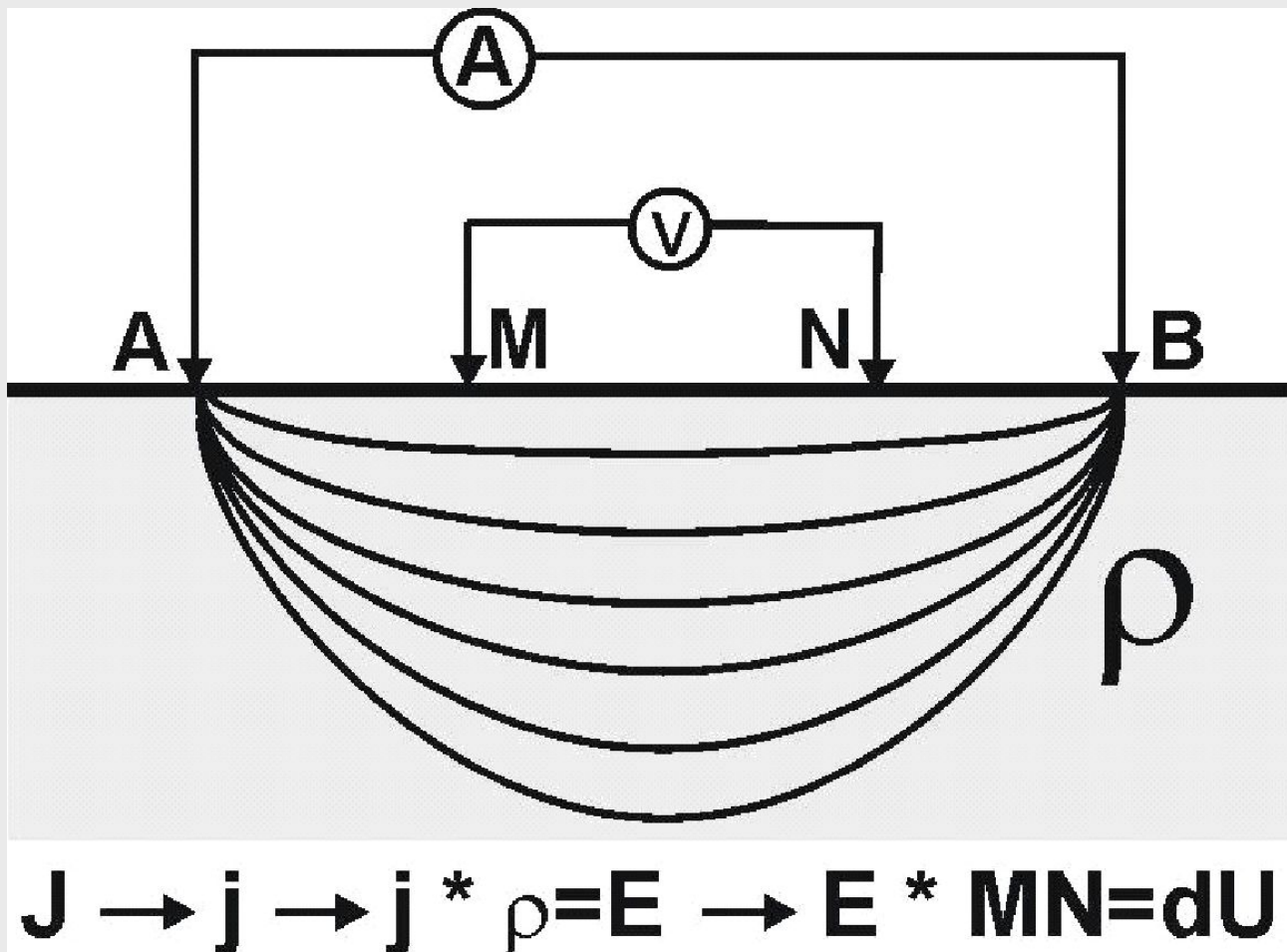
5. Ренессанс методов постоянного тока на базе компьютерных технологий, новых полевых методик (томография) – 90-е годы до настоящего времени. 2D – 3D алгоритмы. Развитие метода ЗСБ. Широкое применение георадара.
- Начало 3-его тысячелетия – Россия становится равноправным субъектом на мировом рынке геофизических услуг. Увеличение объемов работ. Расцвет МТЗ, ЗСБ, радара и ВЭЗ. В области МТЗ доминирование аппаратуры фирмы PHOENIX.
  - 85% научной информации пишется и издается на английском языке. Нравится кому то это или нет, это реальность. Без знания английского языка и чтения научной литературы на английском - отстанете от своей науки навсегда.

# Некоторые примеры, поясняющие отдельные методы э/р



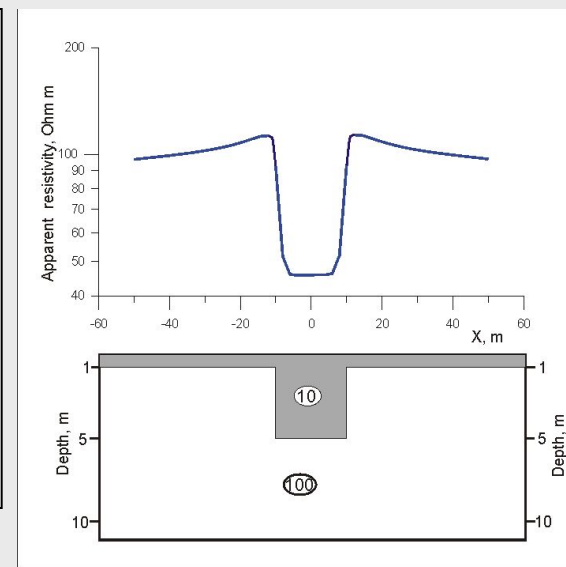
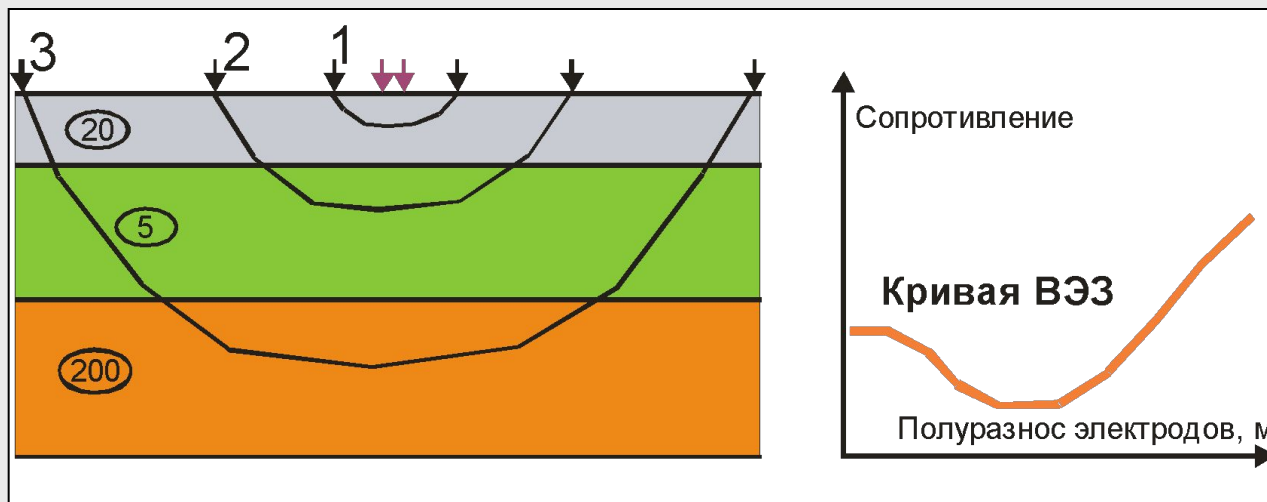
В земле находится рудное тело, обладающее электронной проводимостью (халькопирит, галенит). Оно взаимодействует со средой (влажностью в ней) и само генерирует электрические потенциалы и токи вокруг себя. Первые исследования Фокса (1815 г.) и Шлюмберже (1913) были связаны с этим явлением.

# Метод сопротивлений (ВЭЗ, ЭП и др.)



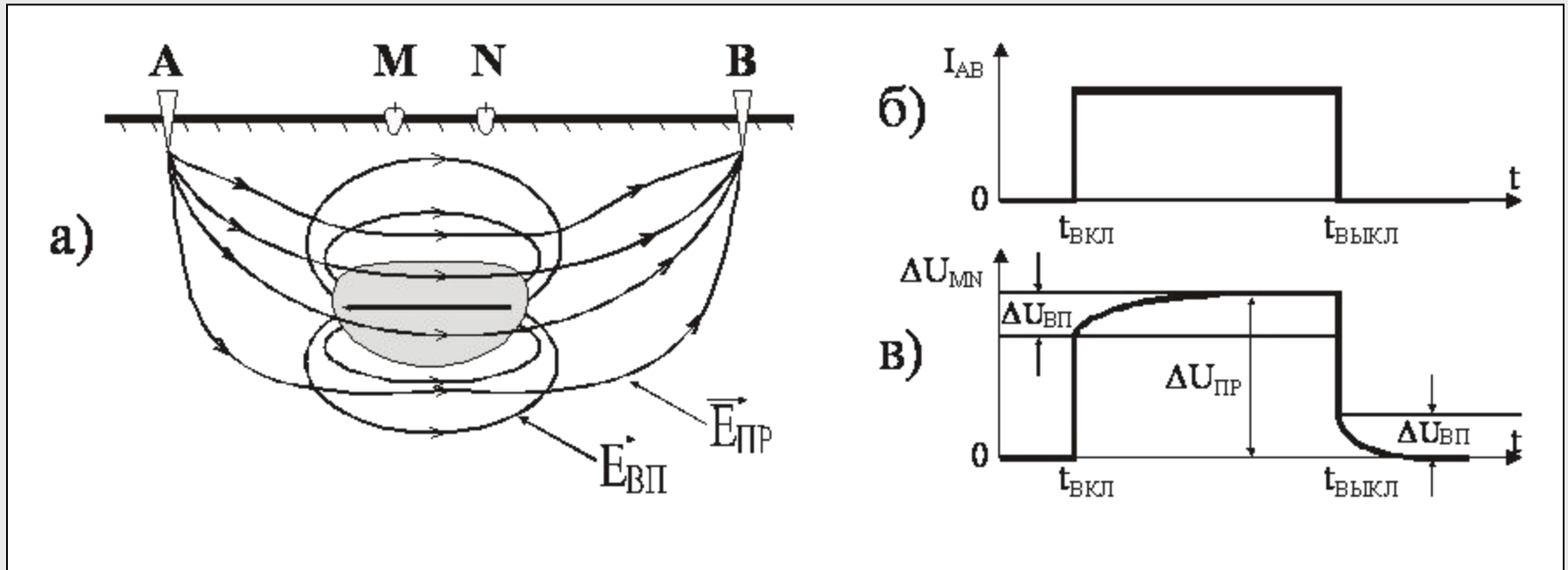
Здесь ток в земле создается внешним генератором (источником). Два электрода для тока и другие два электрода для измерения разности потенциалов. А в результате (26) измеряется сопротивление<sup>21</sup> грунта.

# ВЭЗ и ЭП



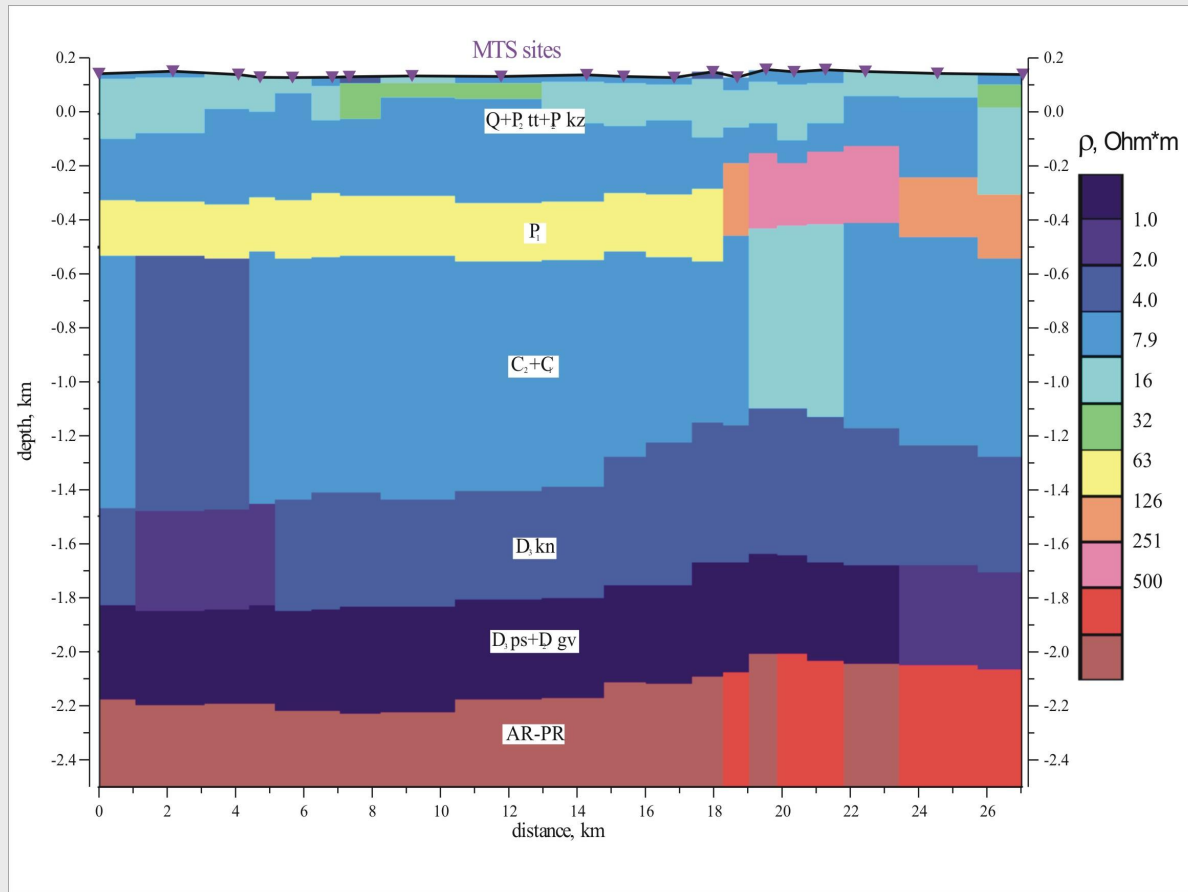
Установка из 4 электродов либо меняет свою длину при неподвижном центре (ВЭЗ), либо перемещается вдоль профиля без изменения длины (ЭП). В методе ВЭЗ чем больше разнос, тем глубже проникает ток. В методе ЭП разнос не меняется и глубина тоже не меняется. А измеряемое поле меняется, потому что изменяется среда.

# Метод вызванной поляризации



Хотя метод был предложен Шлюмберже еще в **1920** г., он практически не применялся в поле до **1960** г., когда появились соответствующие приборы. Рудное тело в земле может быть уподоблено (условно) конденсатору или аккумулятору. При пропускании тока рудное тело заряжается, а после отключения внешнего тока, рудное тело начинает отдавать запасенную энергию. Мерой ВП является отношение напряжения отданного к напряжению приложенному при пропускании тока, выраженное в %. В настоящее время это ведущий метод рудной геофизики.

# Магнито-теллурическое зондирование (МТЗ)



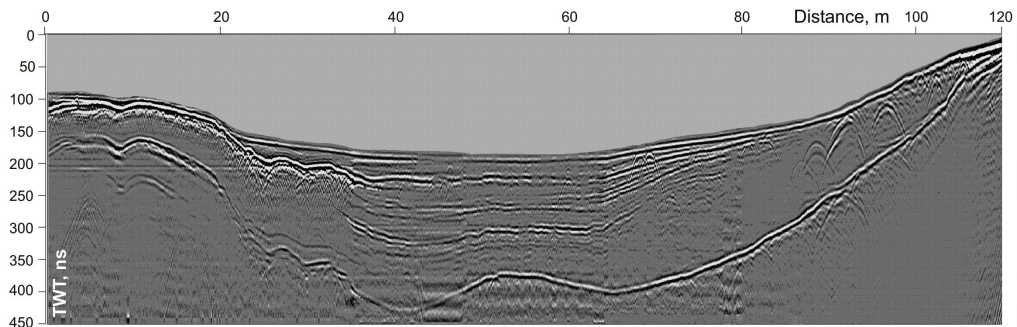
Хотя метод использует естественные переменные э/м поля (т.е. созданные природой) эти поля проникают на большие глубины (сотни метров, километры и десятки км). Поля низких частот (больших периодов) проникают глубже, а высоких частот на меньшую глубину. Измерив поля в широком диапазоне частот получаем приличный интервал глубин.

Изучение локальной структуры в Кировской области на глубину 2.5 км (26) 24

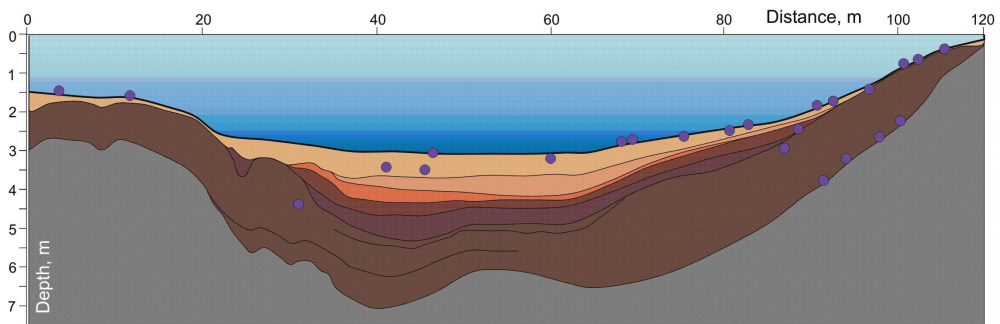


# Георадар - минимальные глубины

Результаты съемки с георадаром "Zond-12" -  
экранированная антенна 300 МГц



Геолого-геофизический разрез по георадарным данным



Глубина 6-7 м

(26)



Георадар на воде



Разработчик георадара Зонд –  
В.П.Золотарев (Рига)

25

# Книги и учебники

Матвеев Б. К. Электроразведка при поисках месторождений полезных ископаемых. – М.: Недра, 1982. – 376с.

Жданов М. С. Электроразведка. – М.: Недра, 1986. (Трудный)

Хмелевской В.К. Электроразведка. – М., МГУ, 1984 г.

**(есть много изданий В.К.Хмелевского «Основы геофизических методов» (для геологов) – но это не для геофизиков).**

Семенов А.С. Электроразведка методом естественного электрического поля. было много изданий.

Комаров В.А. Метод вызванной поляризации.

Ваньян Л.Л. Электромагнитные зондирования. М., 1997 г. 218 с.

М.Н.Бердичевский, В.И.Дмитриев. Магнитотеллурическое зондирование горизонтально-однородных сред. М., Недра, 1992, 250 с.

О.Куфуд. Зондирование методом сопротивлений. М. Недра 1984 г. 270 с.

Блох И.М. Электропрофилирование методом сопротивлений. М., 1971. 216 с.

Электроразведка: пособие по электроразведочной практике для студентов геофизических специальностей. Под ред. проф. Хмелевского, доц.

Модина, доц. Яковлева. М.: Герс, 2005.- 300 с