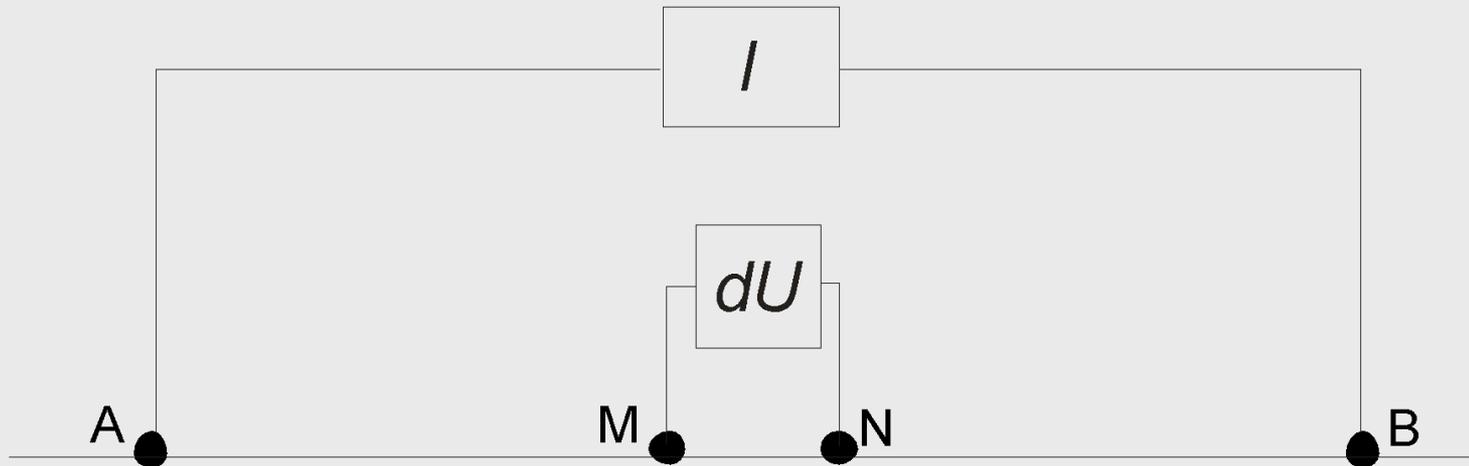


**Сущность электромагнитных
зондирований,
профилирований и
просвечиваний**

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

4-электродная установка

Рассмотрим одну из простейших установок электроразведки, называемую симметричной 4-электродной установкой Шлюмберже. Установкой называют взаимное расположение электродов на поверхности земли.



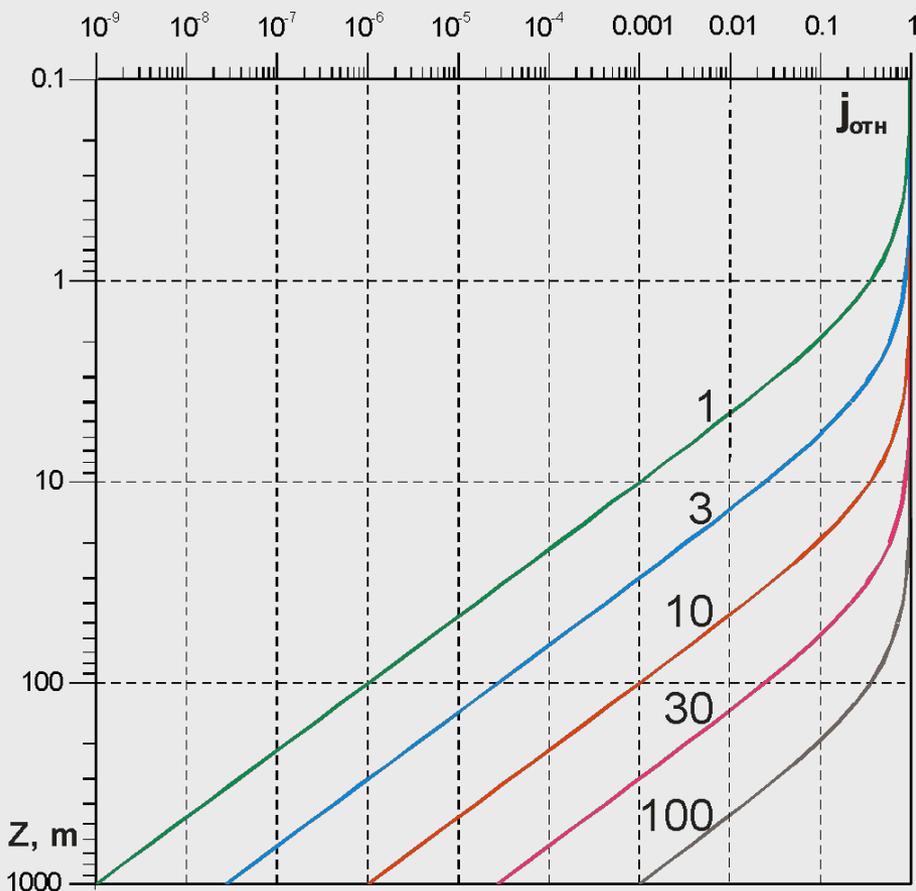
Братья Шлюмберже предложили схему измерения сопротивления земли - четырёхэлектродную установку и в течение нескольких десятилетий убеждали геофизиков, что для оценки сопротивления земли надо использовать 4-х электродную схему.

Сопротивление заземления

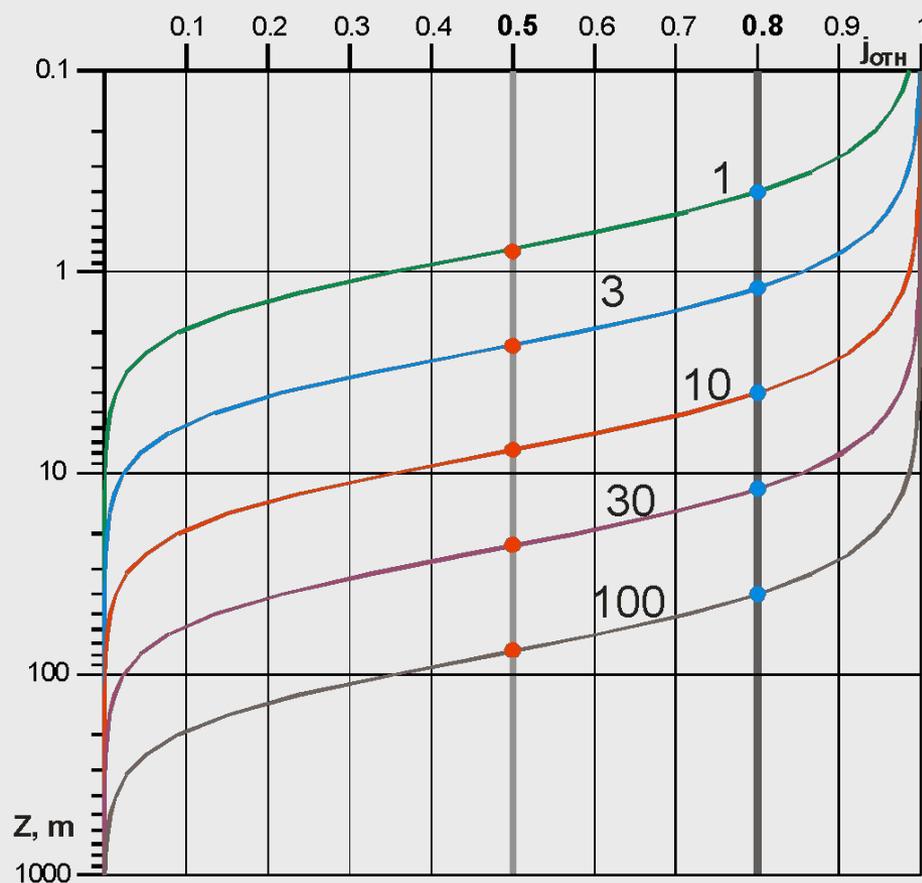
На контакте гальванических заземлителей (электродов) с землей возникает **сопротивление заземления**. Земля состоит из зерен разного размера, промежутки между которыми могут быть заполнены воздухом и водой. Зерна породы и воздух имеют высокое сопротивление, только поровая влага имеет низкое сопротивление, при этом площадь соприкосновения с поровой влагой может составлять малую часть общей площади касания электрода с землей, особенно в сухих грунтах.

Расчеты показали, что **сопротивление заземления это самое большое сопротивление** на пути тока: источник тока, провода, электроды, земля и контакт с землей. **В питающей линии** сопротивление заземления ограничивает **силу тока**, **в измерительной линии** разность потенциалов в земле распределяется **на сопротивлениях заземления и входном сопротивлении измерителя**. В обоих случаях **влияние сопротивления заземления затрудняет проведение работ** уменьшая силу тока и **вызывая падение части измеряемого напряжения на заземлениях**.

Глубина разведки 4-электродной установки



Лог. масштаб по j



Линейный масштаб по j

$Z=1/3 - 1/10$ от АВ, но разнос это $R=AB/2$, что приводит к некоторой путанице. Проще считать что глубина равна половине разноса $R/2$.

Глубина разведки

Этому вопросу были посвящены многие работы на протяжении почти 100 лет. Рисунки на предыдущем слайде с распределением нормированной плотности тока по глубине являются лишь одним из примеров. Нормировка плотности тока осуществляется на величину плотности тока на поверхности, поэтому нормированная плотность тока у поверхности равна 1.

Глубина зависит от разноса между питающими электродами, **чем больше разнос, тем больше глубина разведки** - это и есть **принцип зондирования** в методе ВЭЗ (**вертикального электрического зондирования**). В начале 20 века метод назывался **электробурением**. "**Бурение**" осуществляется от поверхности земли все глубже. Разносы ВЭЗ меняются от минимума (например 1 м) до некоторого максимума, чтобы получить необходимую глубину разведки. Если требуется глубина до 100 м, то максимальный разнос равен 200 м, а вся длина АВ=400 м. Если изучается слоистый разрез и сопротивления слоев сильно различаются, то глубина разведки будет меньше, например 1/5 разноса. Но и это не предел. Если на глубине находится слой очень высокого сопротивления (гипс, ангидрит, плотный малопористый известняк, каменная соль), то метод ВЭЗ **не сможет "пробить" такой слой** и последней границей для ВЭЗ будет **кровля** такого пласта.

Зондирования в электроразведке

Принцип зондирования в методе **ВЭЗ** называется **геометрическим**, т.к **глубина зависит от разноса установки.**

В методах **переменного** тока **глубина разведки зависит от частоты поля** и от сопротивления среды, характеристикой глубины является толщина скин-слоя:

$$h_{\delta} \approx 503 \cdot \sqrt{\rho/f} \approx 503 \cdot \sqrt{\rho \cdot T}$$

где h_{δ} - скин-глубина в м, f - частота поля в Гц, T - период колебаний в сек. Т.о. высокие частоты проникают на небольшую глубину в землю, а с уменьшением частоты глубина разведки возрастает. Обратная величина частоте это период, **чем больше период, тем больше глубина разведки.** Формула для скин-глубины записана для определенных условий, для разных ЭМ методов и разных условий глубина несколько изменяется. Подобный принцип зондирования называется **частотным** (Используется в МТЗ).

В методе **становления поля** используется другой принцип зондирования - временной.

Метод становления поля

Зондирование становлением поля (**ЗС**) – метод электромагнитного зондирования с искусственным (контролируемым) источником, основанный на изучении **поля переходных процессов**, которое возбуждается в земле при изменении тока в источнике. Наиболее широкое распространение получило **ступенчатое возбуждение поля**, как правило, **выключение** тока. При выключении тока в источнике в проводящей среде возникает неустановившееся электромагнитное поле, то есть имеет место процесс становления поля. Глубина проникновения поля переходных процессов в землю **возрастает с увеличением времени**, прошедшего с момента выключения тока в генераторной установке, называемого **временем становления поля**. Этот **принцип зондирования называется временным**. Существуют две разные модификации ЗС: для дальней зоны ЭМ поля (ЗСД), и для ближней зоны (ЗСБ). С 1968 г. большее применение получила методика ЗСБ.

Кажущееся сопротивление для ЗСБ рассчитывается по формуле

$$\rho_{\tau}(t_c) = K_{ЗСБЗ} \cdot \frac{1}{t_c^{5/3}} \cdot \left(\frac{I_0}{\Delta U(t_c)} \right)^{2/3}$$

где K - геометрический коэффициент установки ЗСБ, ΔU - величина измеряемого сигнала, I_0 - сила тока в

источнике, t_c - время становления (с момента выключения тока).

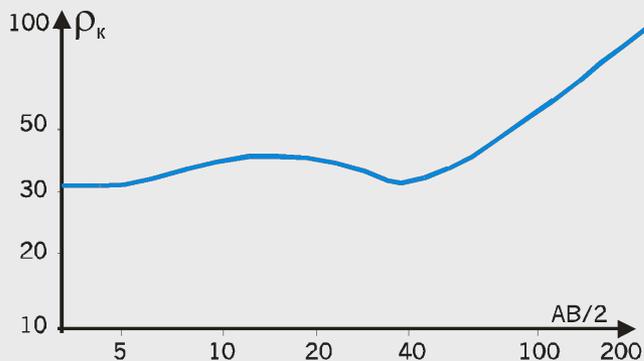
Изображение одного зондирования

Одно зондирование изображают в виде кривой зондирования, где по вертикальной оси откладывают кажущееся сопротивление, а по горизонтальной оси то, что обеспечивает зондирование - в геометрическом (ВЭЗ), частотном (ЧЗ, МТЗ), или временном (ЗСБ) режиме. Для ВЭЗ это $AB/2$, для ЧЗ - $1/\sqrt{f}$ где f - частота в Гц

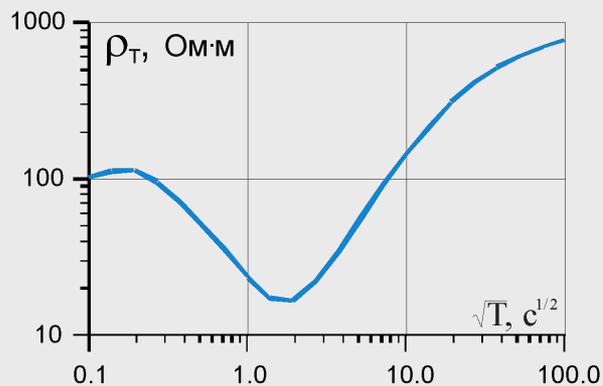
Для МТЗ - \sqrt{T} где T - период в сек.

Для ЗСБ - $\sqrt{2\pi t_c}$ или t_c в мс

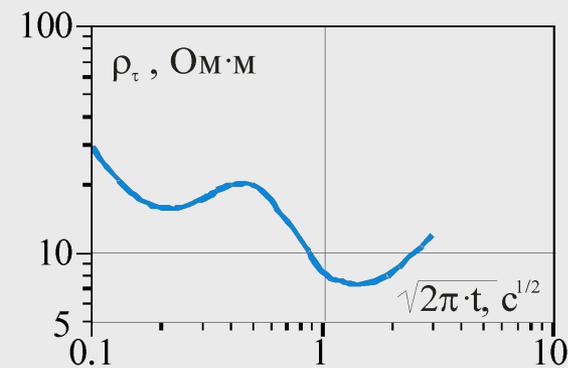
ВЭЗ



МТЗ

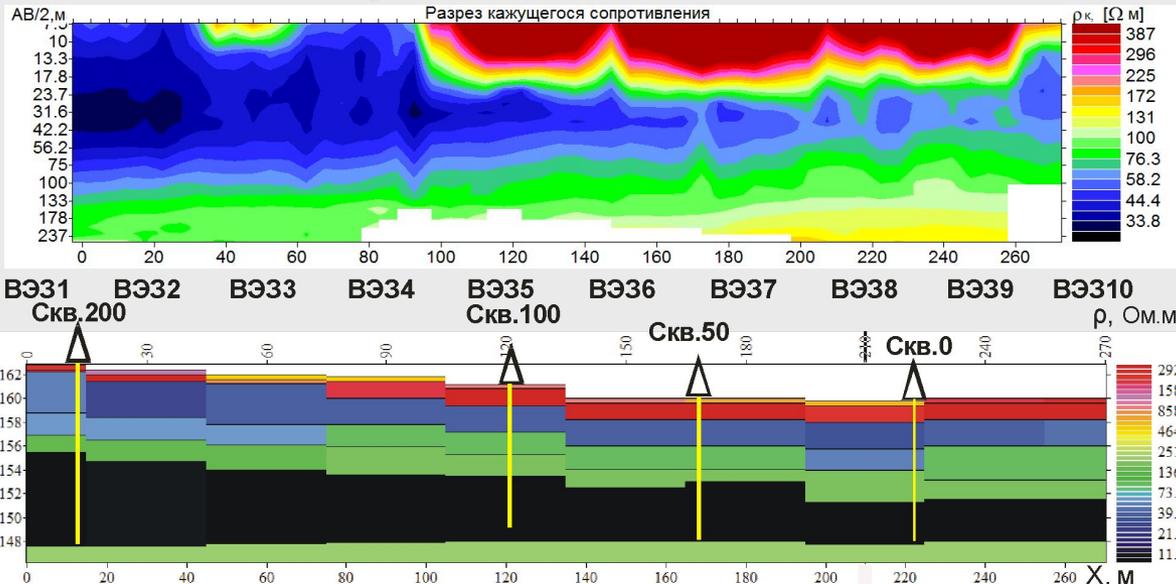


ЗСБ



Форма кривой зондирования отражает изменение сопротивления с глубиной

Изображение профиля зондирований (геоэлектрический разрез)

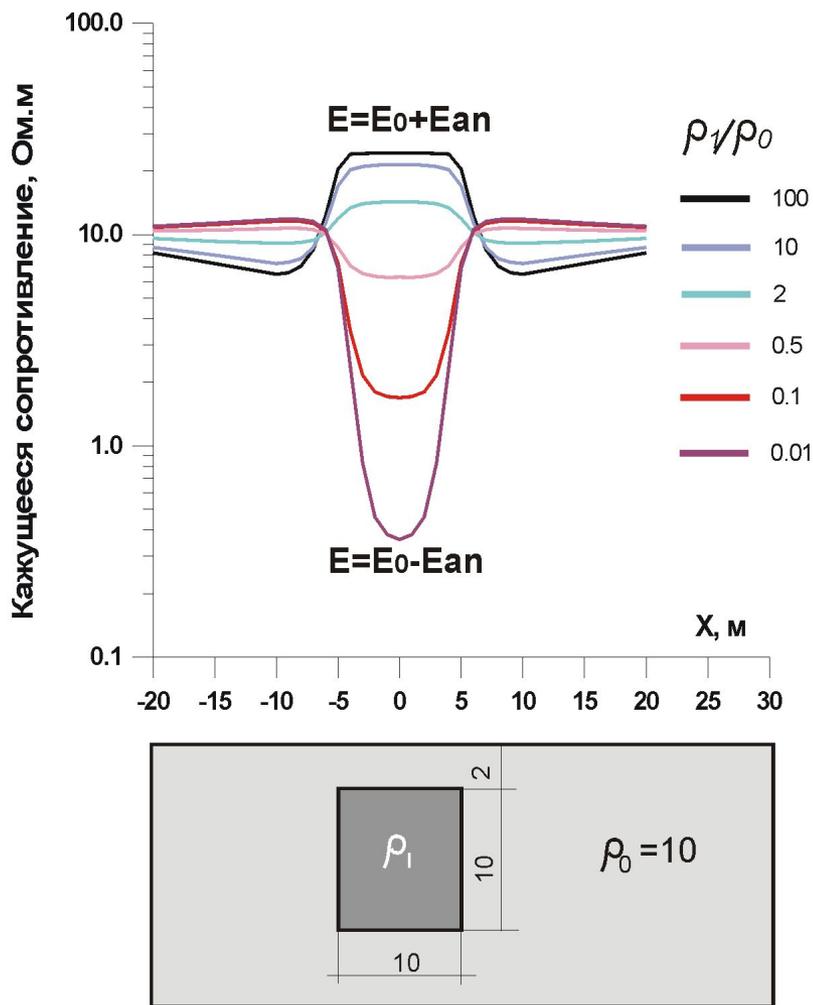


Зондирования по профилю можно изобразить в двух видах: 1. разрез кажущихся сопротивлений (по горизонтали профиль, по вертикали - разнос или иной параметр глубинности, цвет или изолинии - значения ρ_k) - часто говорят - псевдоразрез (вверху).

2. Или как геоэлектрический разрез (результат интерпретации) (по горизонтали профиль, по вертикали - глубина, цвет или изолинии - значения истинного ρ).

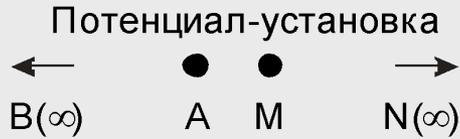
На таком разрезе могут быть показаны рельеф поверхности, буровые скважины (внизу).

Электропрофилирование (ЭП)

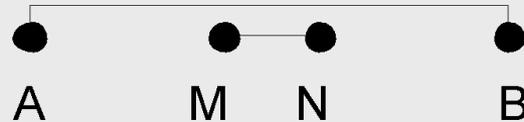


В методе электропрофилирования (ЭП) размеры установки не меняются, поэтому не меняется и глубина разведки. Результат ЭП изображают как график кажущегося сопротивления вдоль профиля, иногда как карту для серии профилей. В начале 20 века метод имел название электробороздование (или наблюдения вдоль профиля при постоянной глубине). По сравнению с зондированием ЭП имеет более высокую производительность, наблюдения по профилю производятся чаще, чем при зондировании. Форма аномалии ЭП соответствует перепаду сопротивления тела и среды. По вертикали ρ_K , по горизонтали - профиль.

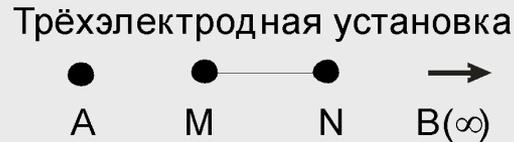
Установки ЭП



Установка Шлюмберже
 $MN < AB/3, R = AB/2$



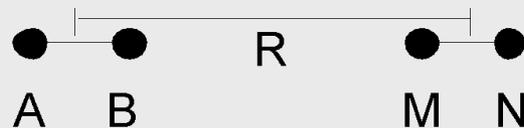
Установкой называют взаимное расположение электродов. При ЭП **выбор установки имеет большое значение** и влияет на форму и выразительность графика ЭП.



Установка Веннера
 $MN = AB/3, R = AB/2$

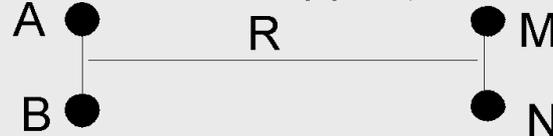


Установка ДОЗ, $R = r/2$

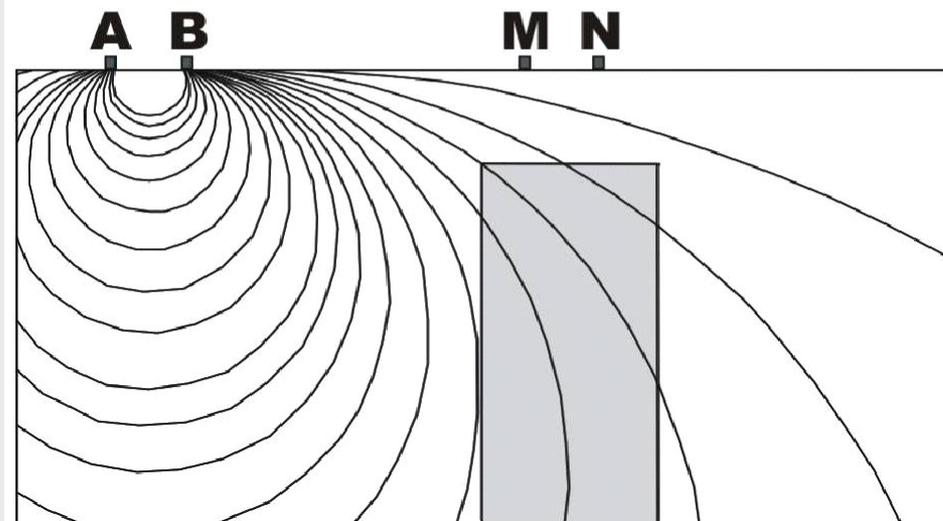
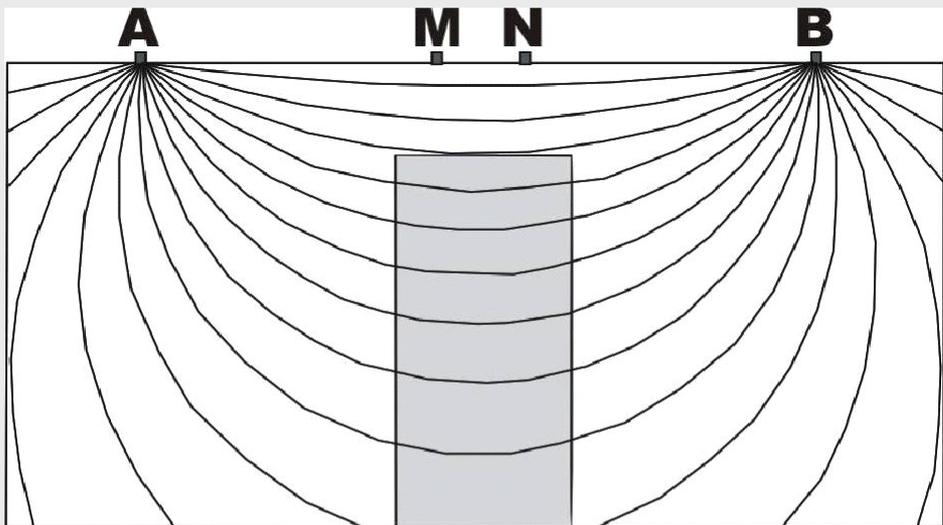


Разные виды установок ЭП:
 2, 3 и 4 - электродные,
 симметричные и
 дипольные

Установка ДЭЗ, $R = r$



Распределение токовых линий от симметричной и дипольной установок



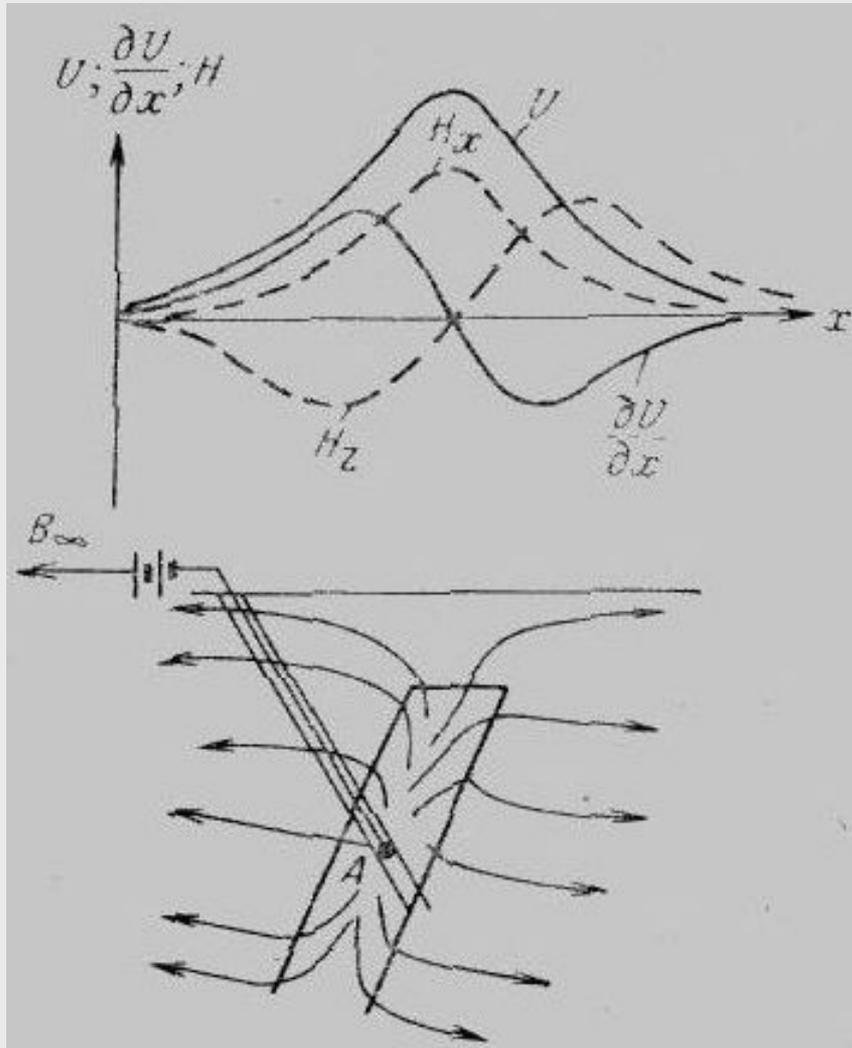
Этот простой пример показывает различие в токовых линиях разных установок в разрезе, что влияет на форму аномалий ЭП над объектами высокого и низкого сопротивления. Выбор установки влияет на результат ЭП.

Вверху - симметричная установка, внизу - дипольная осевая установка

Просвечивания в электроразведке

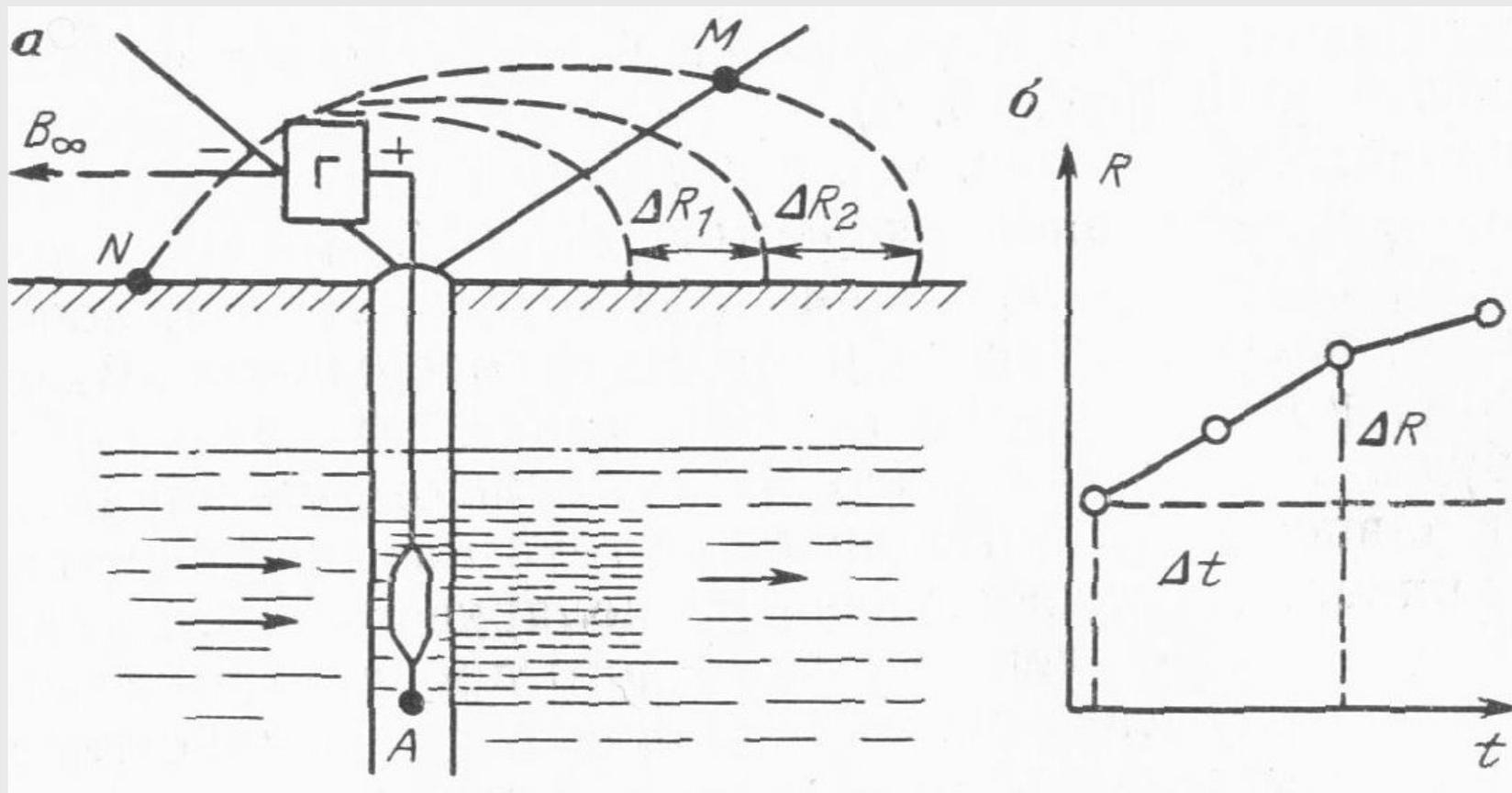
Просвечивания выполняются между двумя скважинами, горными выработками и их цель обнаружить аномальный объект в пространстве между точкой возбуждения поля и точкой приема. Для более надежного понимания результатов просвечиваний проводят измерения для серии точек приема, для серии точек возбуждения поля, или для того и другого. Существуют также методы изучения среды между поверхностью и скважиной или горной выработкой.

Метод заряженного тела



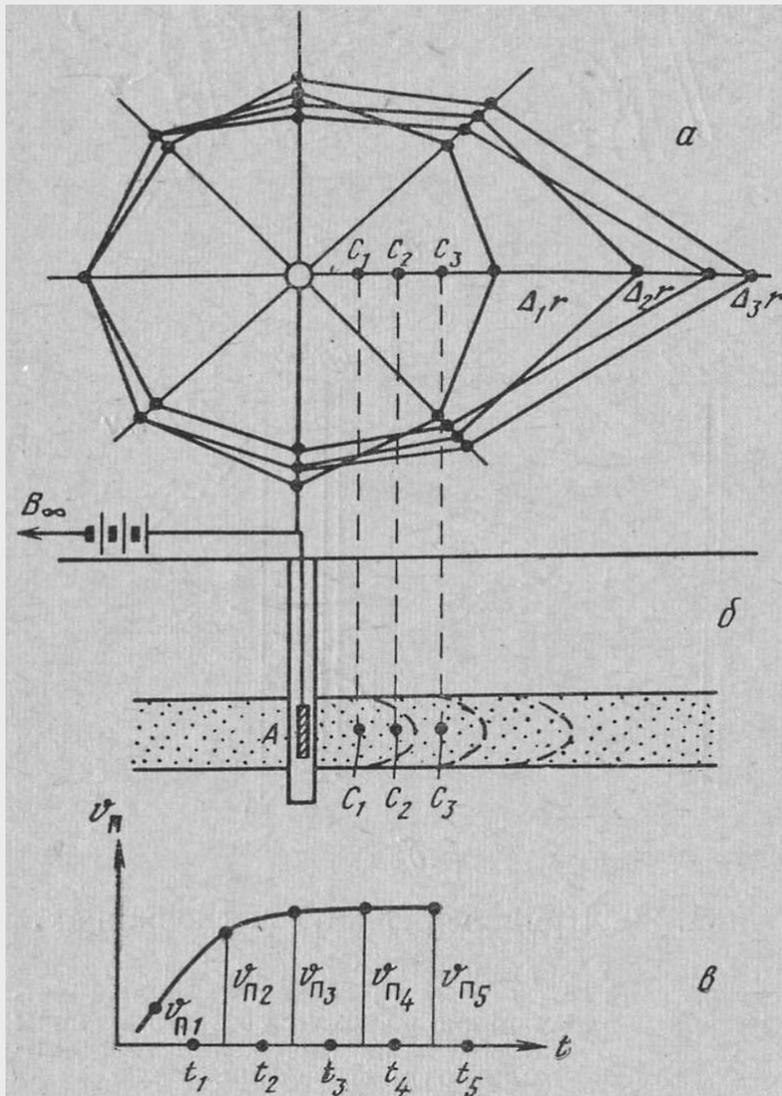
Метод был предложен в начале 20 века. Над пластовой рудной залежью измеряют потенциал U и H_x - графики имеют только максимум, H_z и градиент потенциала dU/dx имеют экстремумы двух разных знаков $+$ и $-$. Чаще всего измеряют электрический потенциал U . Измерения магнитного поля часто выполняют на переменном токе, и у H_z там не будет знаков, будет 2 максимума. Находят положение рудной залежи, глубину, угол наклона.

Гидрогеологический вариант метода заряда (вместо 3 скважин - одна)



Под действием потока воды раствор соли будет вымываться из скважины и около нее образуется «заряженная» зона электролита (низкого сопротивления), **вытянутая в сторону течения подземных вод**. **Передняя граница зоны перемещается со скоростью, примерно равной действительной скорости потока**. Скорость определяется так: $V = \Delta R / \Delta t$ в линейной области.

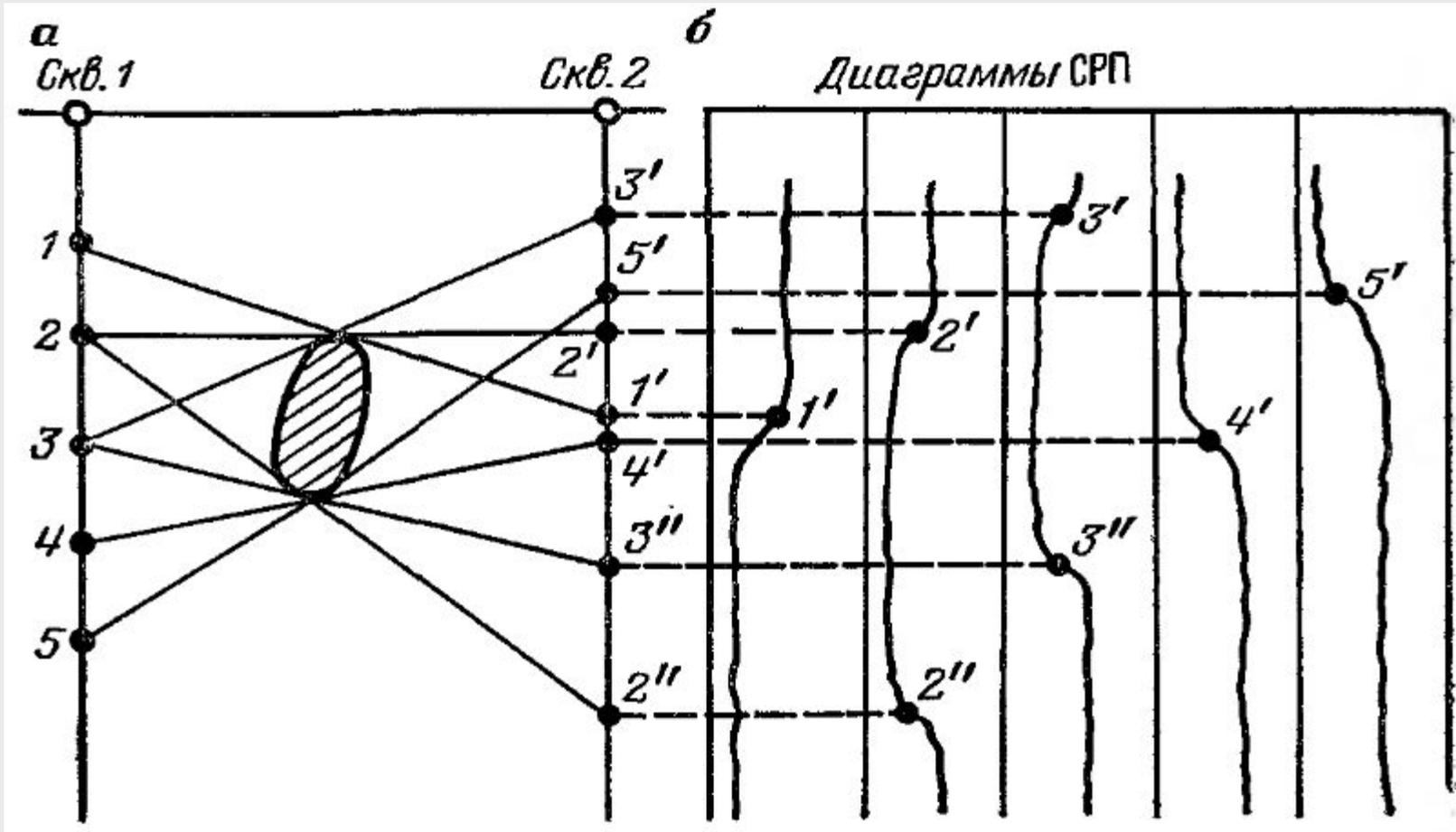
Определение скорости движения подземных вод методом заряда



а - схема смещения изолиний;
б - положение солевого ореола;
в - график зависимости v_n от t .

Почему все изолинии пересекаются в одной точке?
Потому, что там находится неподвижный электрод N.

Радиоволновое просвечивание



Результаты межквартинного просвечивания на переменном токе. а - схема прохождения радиолучей от генератора к приемнику; б - диаграммы напряженности электрического поля; 1-5 - положение передатчика; 1' - 5', 2'' - 3'' - положения приемника

Георадар

Возможность «просвечивания» горных пород радиоволнами была установлена в начале XX века (1909-1910 гг.). В середине 20 века началась реализация георадаров для изучения среды (сначала - ледников). Этому предшествовало "второе открытие георадара" - отражение подошвы льда (в Антарктиде) при использовании самолетного радара. Но фактически лишь с 1990-х годов радары стали рентабельны. Основой метода георадиолокации является излучение высокочастотных импульсов электромагнитных волн и **отражение электромагнитной волны от границ** между веществами, имеющими различные электрические свойства (прежде всего **диэлектрические проницаемости** - ϵ). Диэлектрическая проницаемость влияет на **скорость** распространения волны. Электрическая проводимость (сопротивление) вещества влияет на поглощение волновой энергии. Наибольшая глубина проникновения радиоволн в сухих песках (5 м), наименьшая – в глинах (0.5 м).

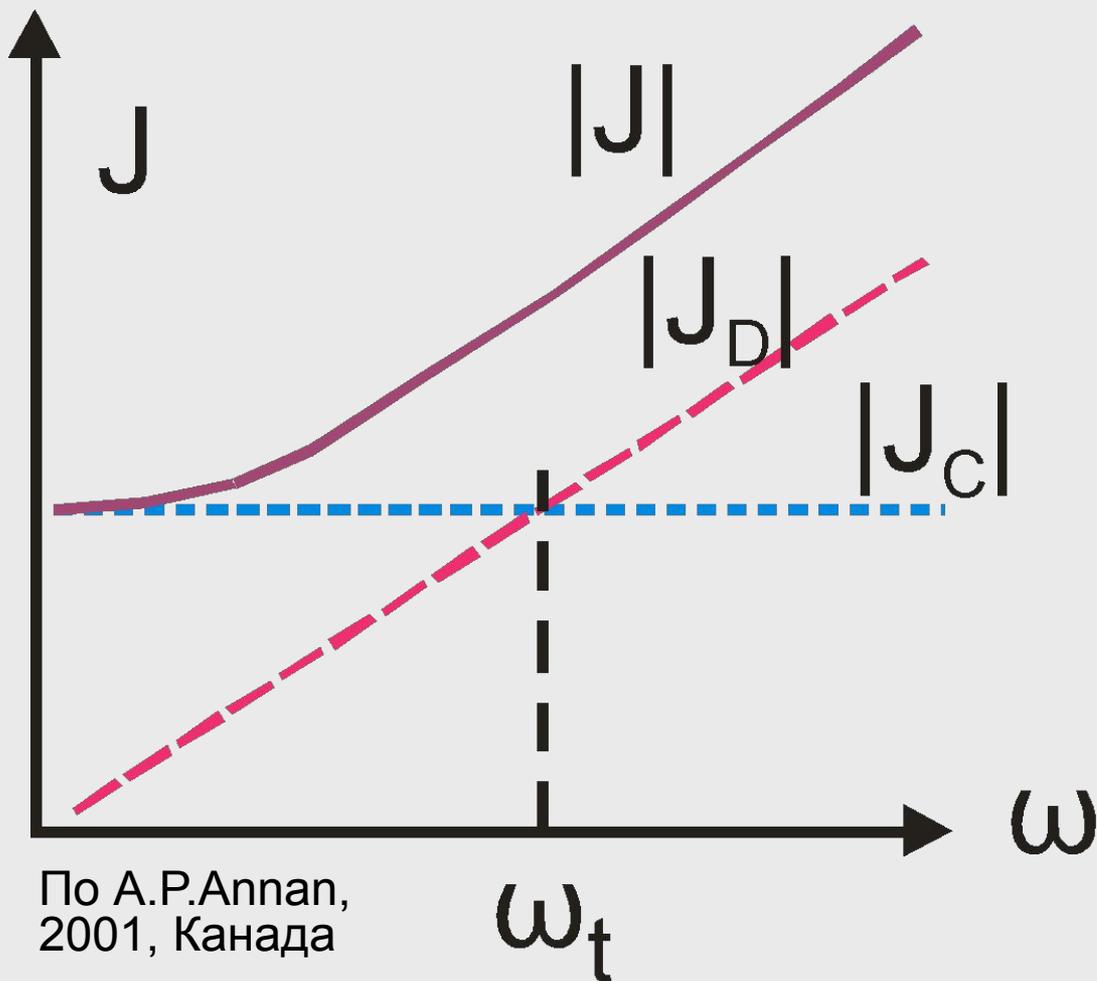
Задачи для георадара

Все задачи, решаемые с помощью георадара, могут быть разделены на две большие группы.

Первая группа включает в себя **геологические, гидрогеологические и инженерно-геологические задачи**: картирование геологических структур - поверхности коренных пород под рыхлыми осадками, уровня грунтовых вод, границ между слоями с различной степенью водонасыщения; определение мощности водного слоя и картирование поддонных отложений.

Вторая группа задач включает в себя **поиск локальных объектов**, обследование инженерных сооружений, например: картирование коммуникаций (трубопроводов и кабелей); исследование участков разреза с нарушенным естественным залеганием грунта - рекультивированных земель, засыпанных выемок.

Токи смещения и проводимости



Этот рисунок я показывал на лекции по ЭМ свойствам. С ростом частоты растет доля токов смещения и не меняется ток проводимости. С некоторой частоты ток смещения становится больше токов проводимости и с этого момента можно применять георадар. Это частоты от десятков МГц до первых ГГц.

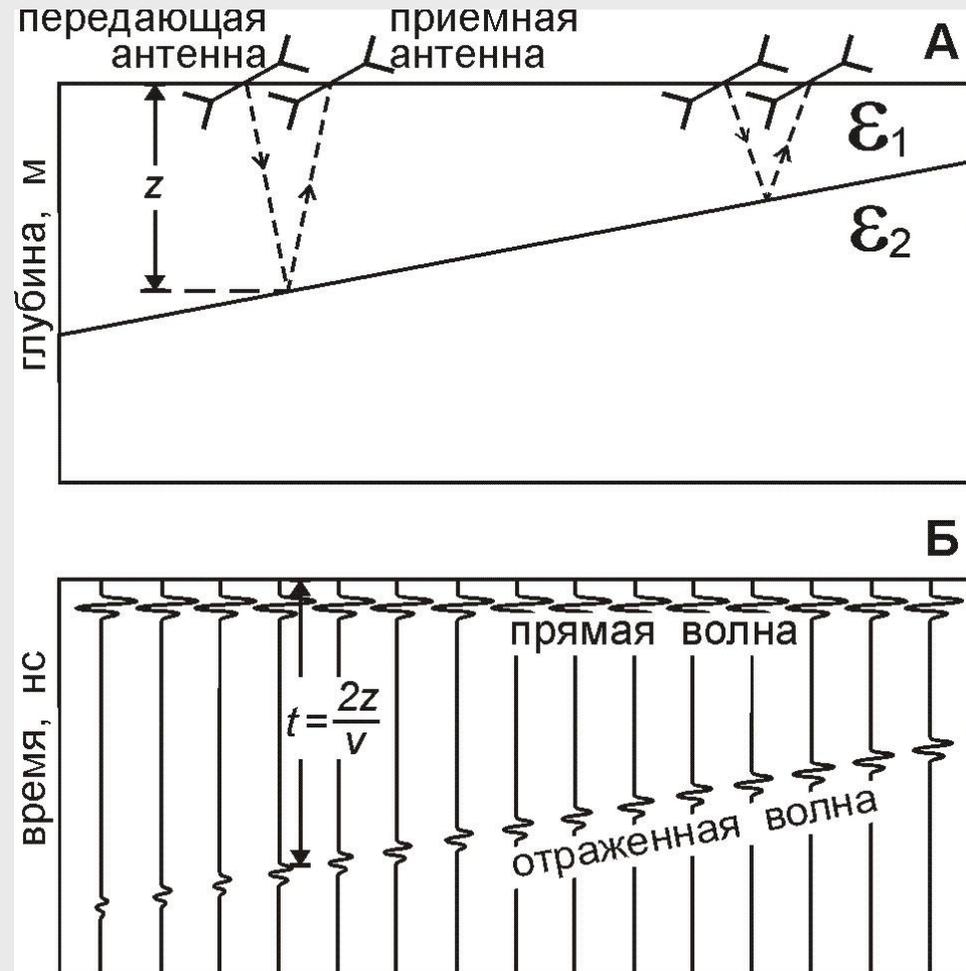
По А.Р.Аннап,
2001, Канада

ТИПЫ ВОЛН В ГЕОРАДАРЕ

В георадиолокации используются три основных типа волн: прямая, отраженная и дифрагированная волна

Отражение
электромагнитных волн

$$K_{\text{ОТР}} = \frac{\sqrt{\epsilon_1} - \sqrt{\epsilon_2}}{\sqrt{\epsilon_1} + \sqrt{\epsilon_2}}$$

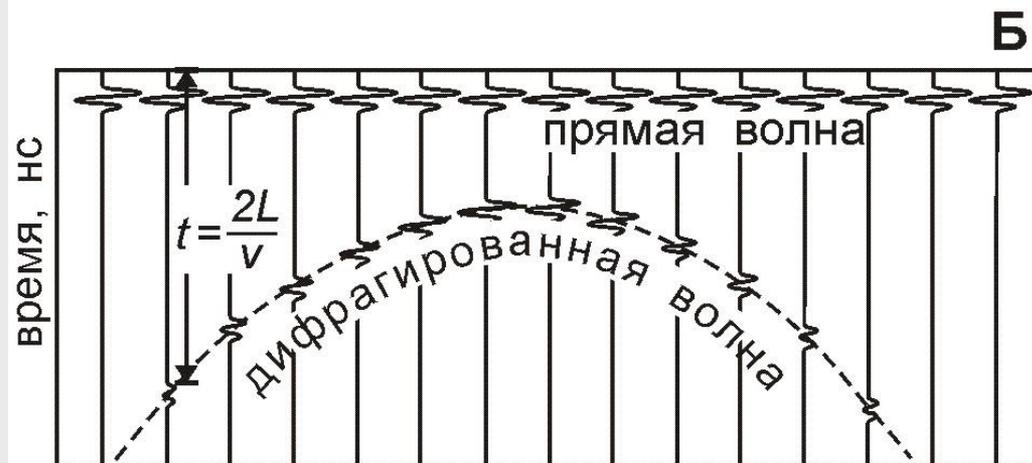
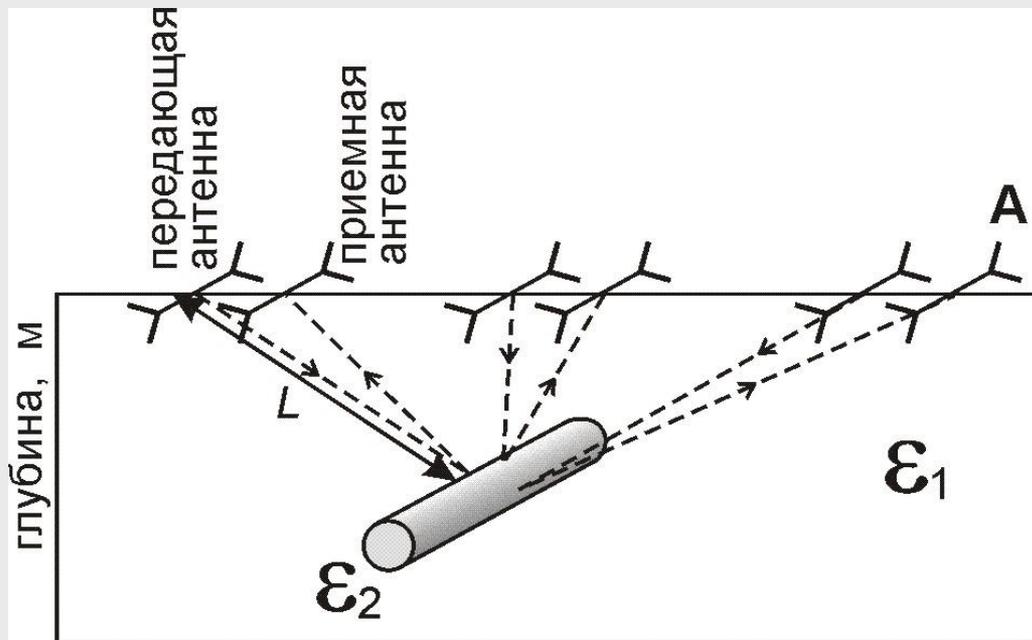
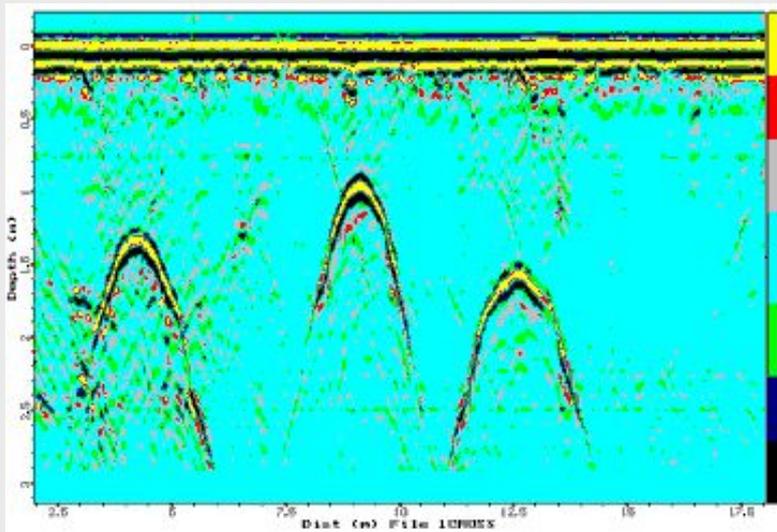


Дифракция

Дифракция
электромагнитных волн

$$t(\mathbf{x}) = \frac{2L}{V} = \frac{2\sqrt{x^2 + h^2}}{V}$$

Уравнение гиперболы



Связь глубины изучения и частоты радара

Глубина на (м)	Центральная частота (МГц)
0.5	1000
1	500
2	200
7	100
10	50
30	25
50	10

Антенны

Различают антенны приемные, излучающие и приемно-излучающие (то есть одна и та же антенна сначала излучает, а потом принимает). По принципу действия различают антенны дипольные, рупорные и щелевые.

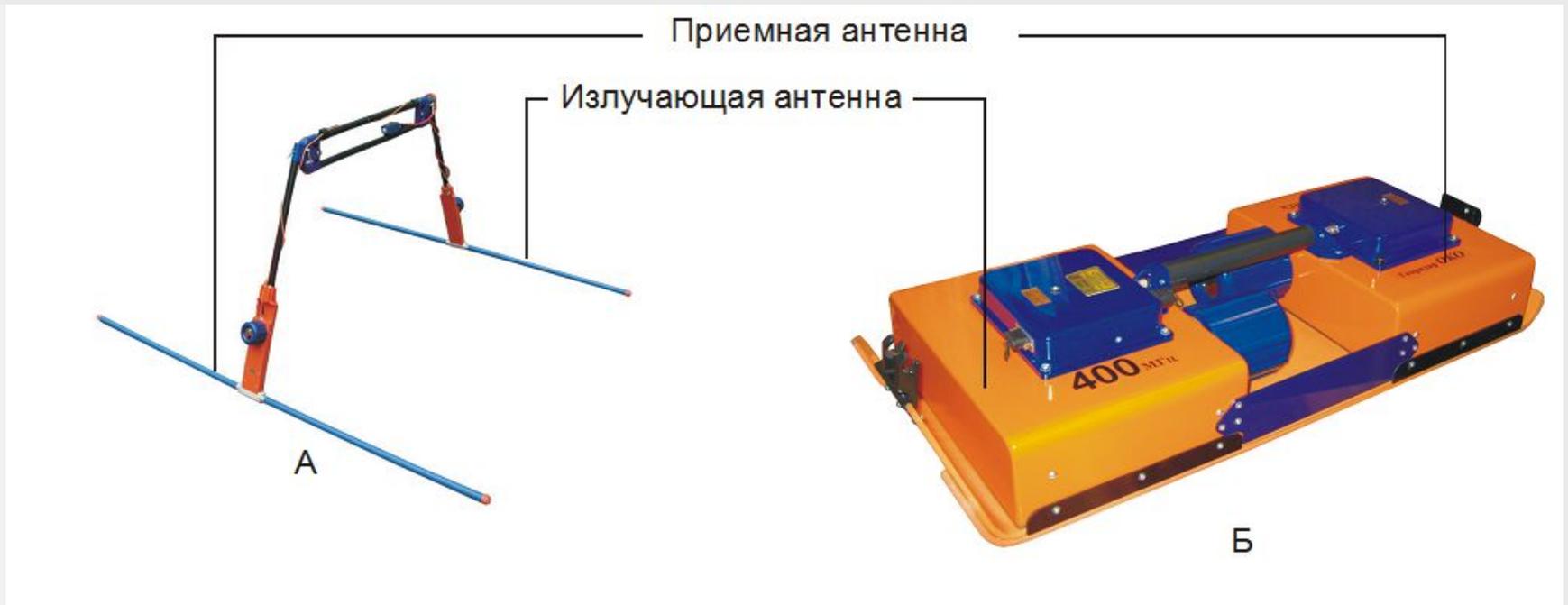


Рис.2. Примеры дипольных антенн георадара "ОКО".

А - простая дипольная антенна АБД, Б- экранированная дипольная антенна типа "бабочка" АБ-400.

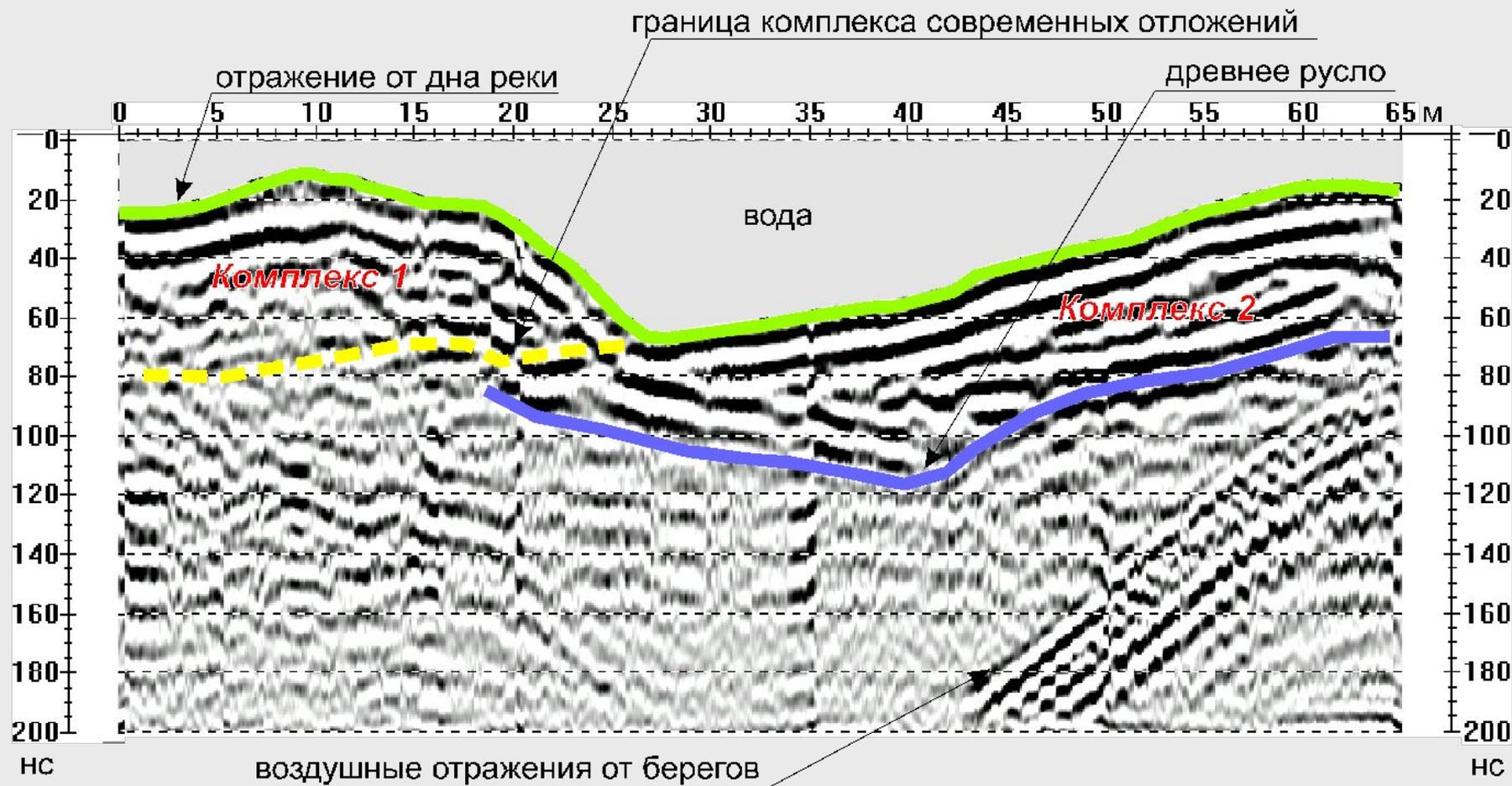
Радар ОКО на суше



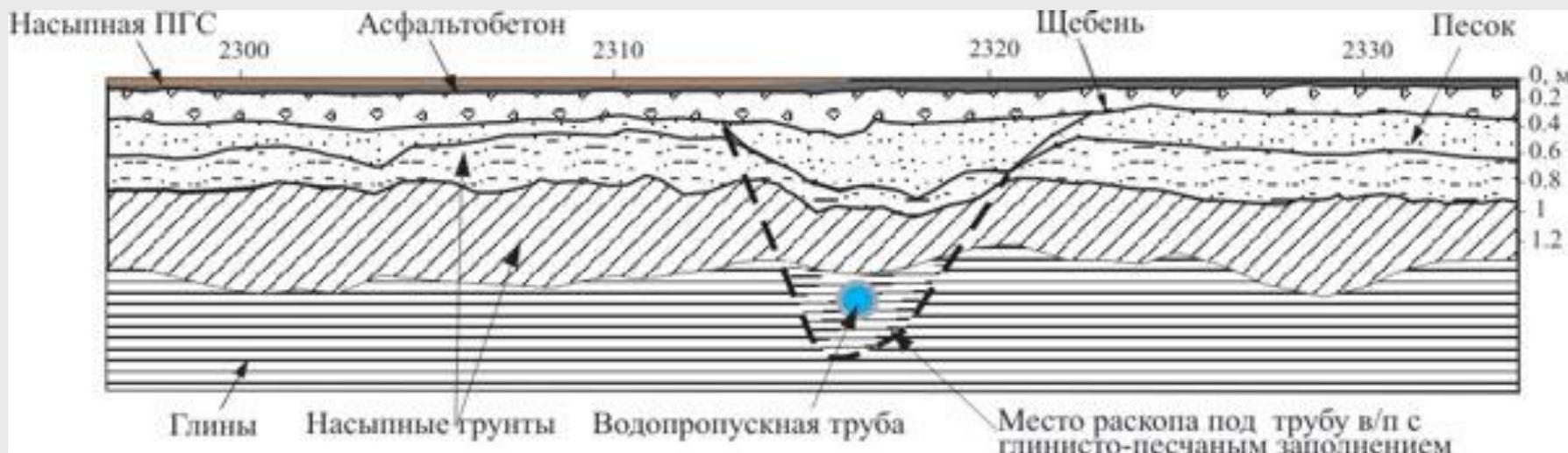
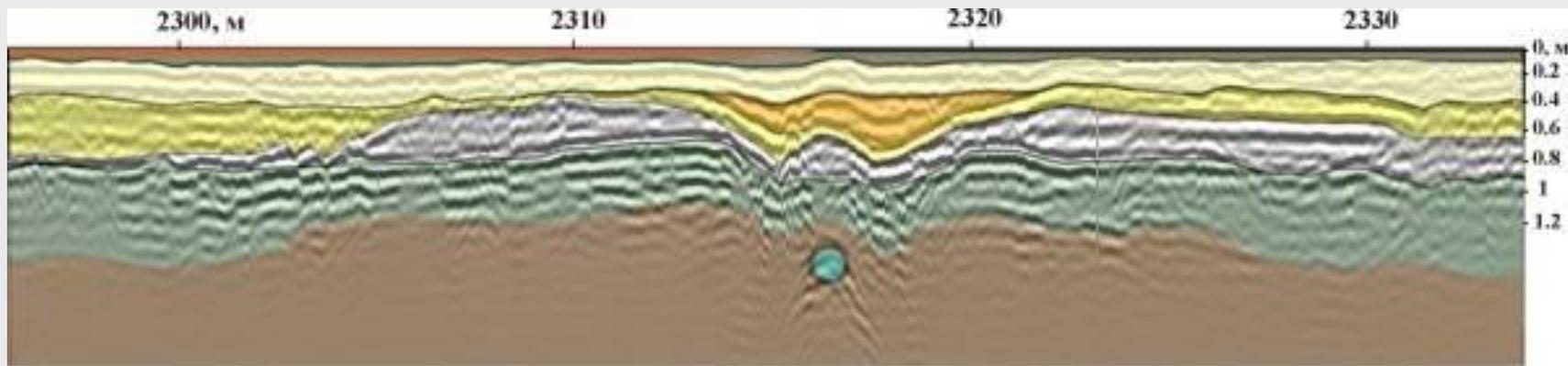
Радар на воде, изучение донных отложений



Применение георадара на реке

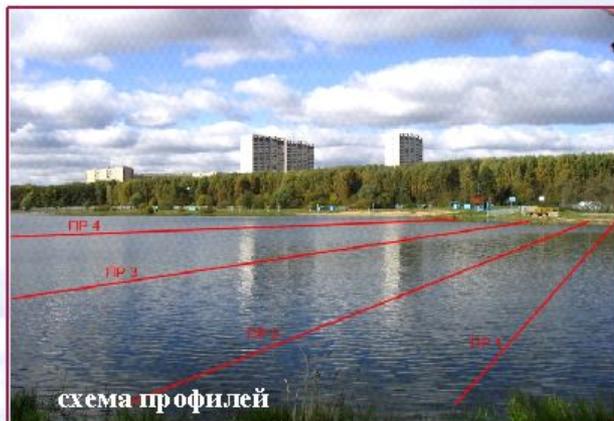


Результаты радара на автодороге



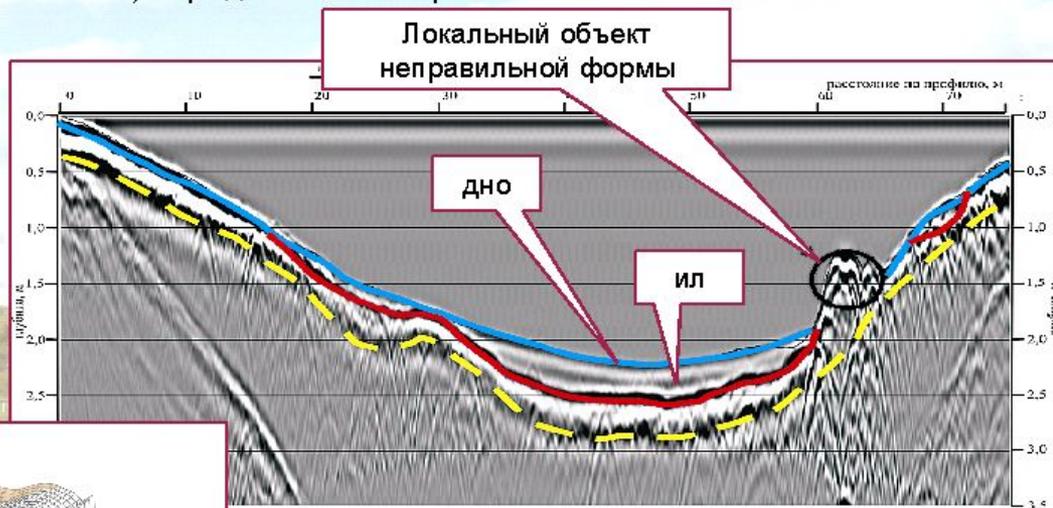
Обследование водоемов

Георадиолоационное обследование Восточного Удальцовского пруда (г. Москва)



Задачи:

- 1) определение глубины дна ;
- 2) определение мощности иловых отложений.

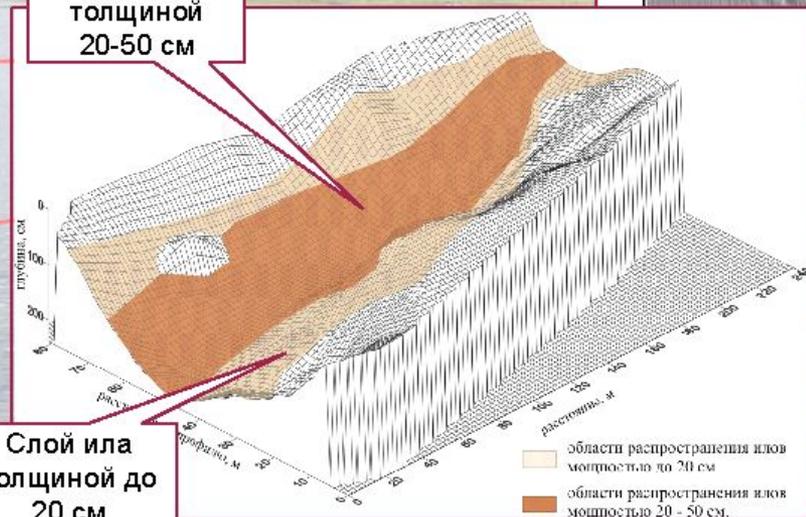


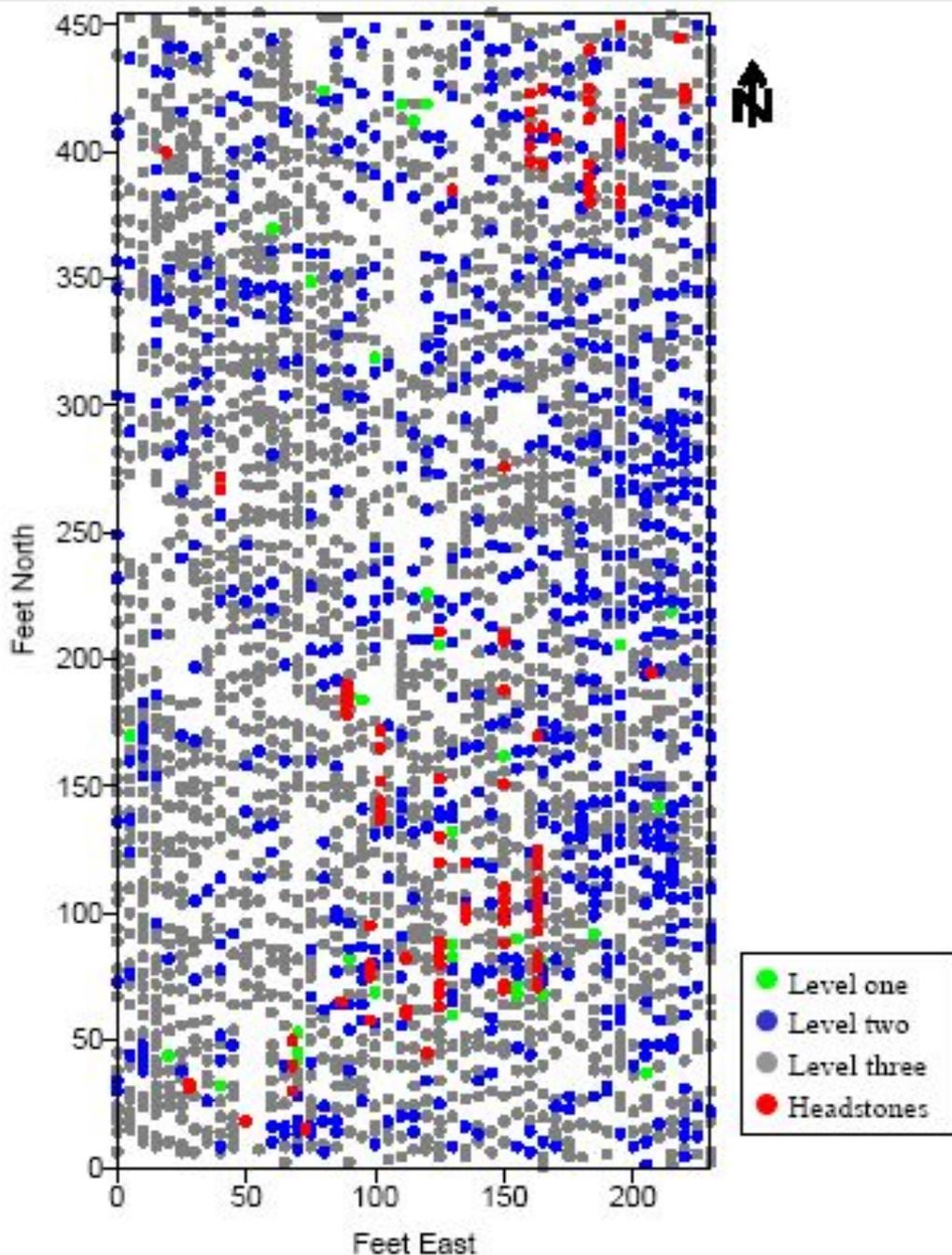
Радарограмма с результатами интерпретации по одному из профилей

Трехмерная модель поверхности дна с указанием областей распространения илов

Слой ила толщиной 20-50 см

Слой ила толщиной до 20 см





Финальная карта территории кладбища в США

Красные точки - где есть памятники, зеленые, синие, серые точки - разная надежность объектов по радару.

Вся площадь заполнена. Больше хоронить негде.