Метод сопротивлений без заземлений

Б.Г. Сапожников

Институт геоэкологии РАН

Санкт-Петербургское отделение

Основные вопросы доклада:

1. Существует ли электрическое поле в воздухе при работах методом сопротивлений?
2. Возможно ли его измерение?
3. Возможно ли обнаружение подземных объектов при измерениях электрического поля в воздухе?
4. Технология и аппаратура.
5. Примеры работ в полевых и городских условиях.
6. Заключение.

1.1. Метод сопротивлений. Электрическое поле в земле

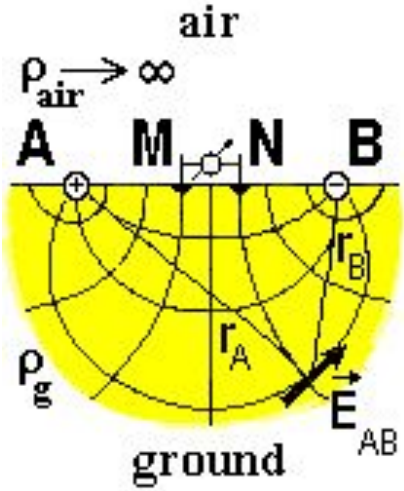


Fig.1

$$\left.\begin{aligned} \vec{E}_A &= \frac{I}{2\pi}\cdot\rho_g\cdot\frac{\vec{r}_A}{r_A^3} \\ \vec{E}_B &= \frac{I}{2\pi}\cdot\rho_g\cdot\frac{\vec{r}_B}{r_B^3} \\ \vec{E}_{AB} &= \vec{E}_A + \vec{E}_B \end{aligned}\right\} \qquad (1)$$

На Fig.1 показаны изолинии потенциала и линии тока электрического поля двух заземленных электродов «А» и «В». Этот рисунок обычно используют для объяснения теоретических основ метода сопротивлений. Формулы (1) описывают электрическое поле постоянного тока в земле.

Однако картина поля не является полной. Здесь не показаны линии электрического поля в воздухе. Воздух можно рассматривать как идеальный изолятор, препятствующий протеканию гальванического тока. Поэтому с помощью линий тока невозможно изобразить электрическое поле в воздухе. Означает ли это отсутствие в воздухе электрического поля?

1.2. Электрическое поле в земле и в воздухе

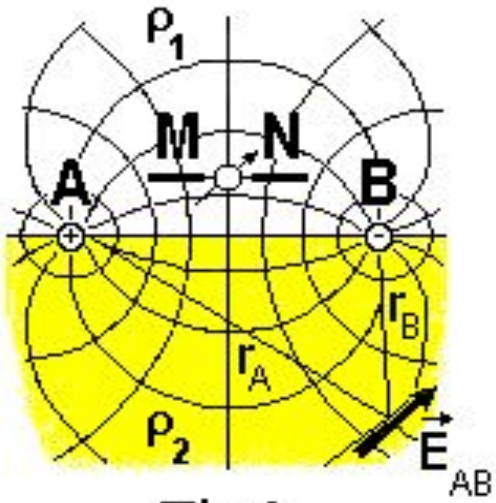


Fig.2

$$\left.\begin{aligned}
\vec{E}_A &= \frac{I}{2\pi}\cdot\frac{\rho_1\rho_2}{\rho_1+\rho_2}\cdot\frac{\vec{r}_A}{r_A^3}\\
\vec{E}_B &= \frac{I}{2\pi}\cdot\frac{\rho_1\rho_2}{\rho_1+\rho_2}\cdot\frac{\vec{r}_B}{r_B^3}\\
\vec{E}_{AB} &= \vec{E}_A+\vec{E}_B\\
\lim_{\rho_1\to\infty}\vec{E}_A &= \frac{I}{2\pi}\cdot\rho_g\cdot\frac{\vec{r}_A}{r_A^3}
\end{aligned}\right\}\qquad(2)$$

Для того, чтобы ответить на этот вопрос рассмотрим Fig.2. Картина электрического поля и формулы (2) описывают общий случай, соответствующий двум однородным полупространствам с удельными сопротивлениями «ρ_1» и «ρ_2».

Вычисляя предел формул (2), нетрудно убедиться в том, что они переходят в формулы уравнений (1) и позволяют определить электрическое поле, как в земле, так и в воздухе.

Картина электростатического поля в воздухе (изолинии потенциала и линии напряженности поля) оказывается зеркальным отражением электрического поля постоянного тока в земле, как показано на Fig.2.

1.3. Электрическое поле в земле и в воздухе

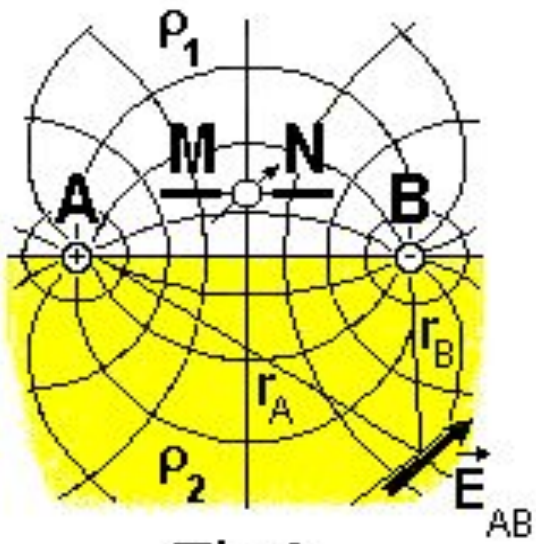


Fig.2

$$\left.\begin{aligned}
\vec{E}_A &= \frac{I}{2\pi}\cdot\frac{\rho_1\rho_2}{\rho_1+\rho_2}\cdot\frac{\vec{r}_A}{r_A^3}\\
\vec{E}_B &= \frac{I}{2\pi}\cdot\frac{\rho_1\rho_2}{\rho_1+\rho_2}\cdot\frac{\vec{r}_B}{r_B^3}\\
\vec{E}_{AB} &= \vec{E}_A+\vec{E}_B\\
\lim_{\rho_1\to\infty}\vec{E}_A &= \frac{I}{2\pi}\cdot\rho_g\cdot\frac{\vec{r}_A}{r_A^3}
\end{aligned}\right\}\qquad(2)$$

Из рассмотрения Fig.2 следует, что горизонтальная составляющая электрического поля в центральной части линии «АВ» одинаково медленно уменьшается при перемещении точки наблюдения в обе стороны от поверхности раздела земля-воздух.

Это означает, что высотная зависимость для этой составляющей поля чрезвычайно мала. Этой зависимостью вполне можно пренебречь, когда наблюдения проводятся на высотах 1-5 % от длины линии «АВ».

Вертикальная составляющая электрического поля в воздухе в центральной части линии «АВ» много меньше горизонтальной составляющей.

1.4. Электрическое поле в земле и в воздухе

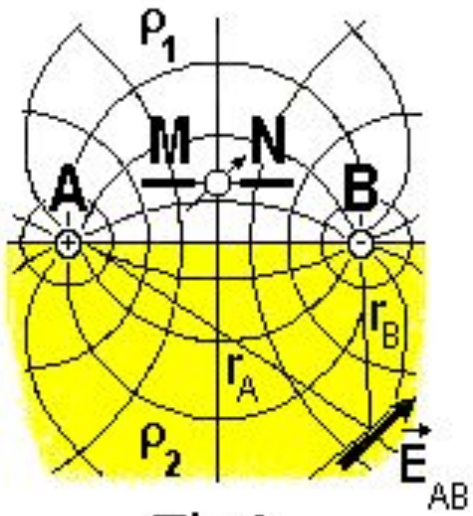


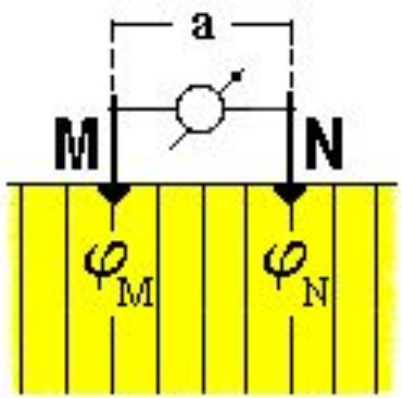
Fig.2

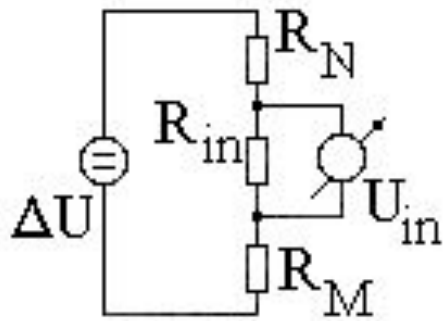
$$\left.\begin{aligned}
\vec{E}_A &= \frac{I}{2\pi}\cdot\frac{\rho_1\rho_2}{\rho_1+\rho_2}\cdot\frac{\vec{r}_A}{r_A^3}\\
\vec{E}_B &= \frac{I}{2\pi}\cdot\frac{\rho_1\rho_2}{\rho_1+\rho_2}\cdot\frac{\vec{r}_B}{r_B^3}\\
\vec{E}_{AB} &= \vec{E}_A+\vec{E}_B\\
\lim_{\rho_1\to\infty}\vec{E}_A &= \frac{I}{2\pi}\cdot\rho_g\cdot\frac{\vec{r}_A}{r_A^3}
\end{aligned}\right\} \qquad (2)$$

Таким образом, при измерении электрического поля в воздухе вблизи границы раздела земля-воздух очевидной физической предпосылкой предложенного усовершенствования является известное *равенство* тангенциальных составляющих электрического поля по обе стороны граничной поверхности.

Это позволяет заменить контактные измерения электрического поля (с применением заземленных электродов) *бесконтактными* измерениями с использованием приемных электродов-антенн. Последние либо вообще не имеют гальванического контакта с землей, либо этот контакт очень плохой.

2. Измерение электрического поля в земле





$$\Delta U = \varphi_M - \varphi_N \qquad U_{in} = \frac{\Delta U}{1 + \frac{R_N}{R_{in}} + \frac{R_M}{R_{in}}}$$

Fig.3

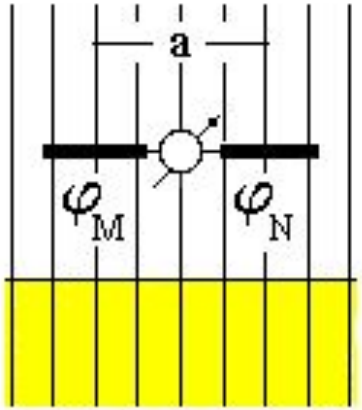
На Fig.1 (слайд 3) показана обычная заземленная приемная линия «MN». Та же линия изображена на Fig.3 в увеличенном масштабе.

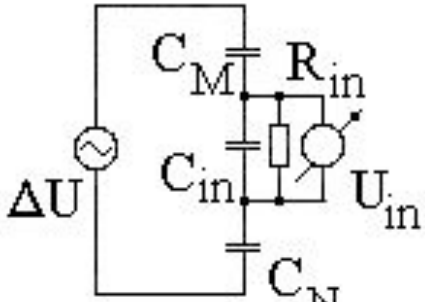
Эквивалентная электрическая цепь линии «MN» (Fig.3) содержит ЭДС «ΔU» (разность потенциалов между приемными электродами), входное сопротивление «R_{IN}» микровольтметра и переходные сопротивления заземлений «R_M» и «R_N».

Из уравнения на Fig.3 следует, что при благоприятных условиях заземлений входное напряжение «U_{IN}», измеряемое микровольтметром, почти равно «ΔU». В этом случае сумма сопротивлений «R_M+R_N» достаточно мала по сравнению с входным сопротивлением «R_{IN}».

По результатам измерений «ΔU» и известной длине «a» приемной линии легко вычислить значение напряженности «E_X» горизонтальной составляющей электрического поля: $E_X = \Delta U / a$.

3.1. Измерение электрического поля в воздухе





$$\lim_{f \to 0} U_{in} = 0$$

$$\Delta U = \varphi_M - \varphi_N$$

$$\lim_{f \to f_{max}} U_{in} = \frac{\Delta U}{1 + \frac{C_{in}}{C_N} + \frac{C_{in}}{C_M}}$$

Fig.4

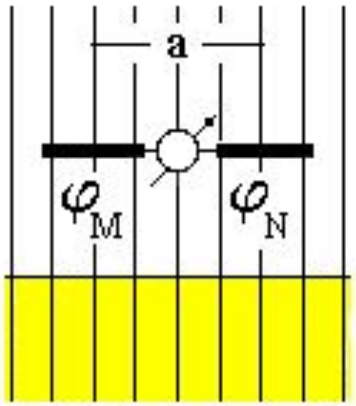
На Fig.2 (слайд 6) показана незаземленная приемная линия с двумя одинаковыми электродами «M» и «N». На Fig.4 та же линия представлена в увеличенном масштабе.

Как и в случае заземленной приемной линии, разнос «a» здесь равен расстоянию между центрами приемных электродов. Разнос «a» - эффективная длина приемной антенны .

Линия «MN» изготовлена из двух равных отрезков изолированного провода. Она может непосредственно лежать на земле («стелющаяся» линия), либо может быть поднята на значительную высоту над землей. Каждый из электродов приемной линии приобретает потенциал эквипотенциальной линии, проходящей через его центр.

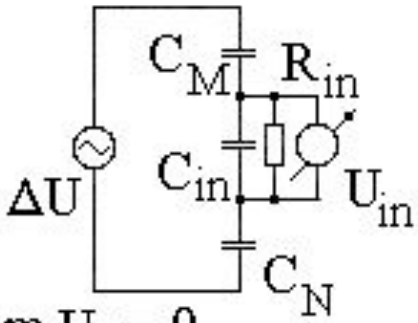
Эквивалентная электрическая цепь линии «MN» (Fig.4) содержит ЭДС «ΔU» и емкостной делитель напряжения, образованный входным импедансом микровольтметра и собственными емкостями «C_M» и «C_N» приемных электродов.

3.2. Измерение электрического поля в воздухе



$$\Delta U = \varphi_M - \varphi_N$$

Fig.4



$$\lim_{f \to 0} U_{in} = 0$$

$$\lim_{f \to f_{max}} U_{in} = \frac{\Delta U}{1 + \frac{C_{in}}{C_N} + \frac{C_{in}}{C_M}}$$

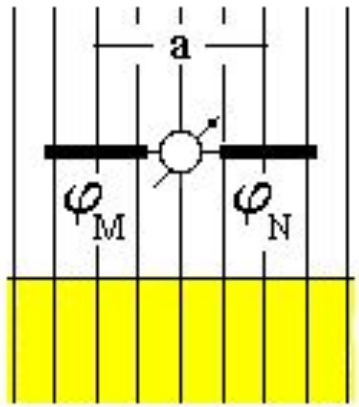
Для того, чтобы обосновать выбор рабочей частоты, рассмотрим эквивалентную электрическую схему приемной линии на Fig.4.

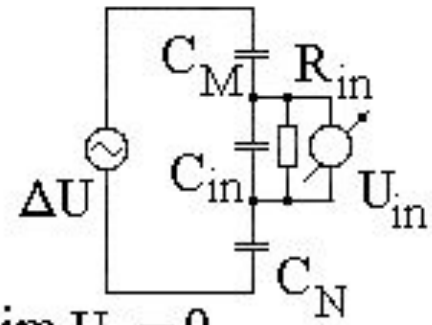
На постоянном токе сигнал на входе микровольтметра равен нулю. С повышением частоты входная цепь микровольтметра трансформируется в частотно-независимый делитель напряжения.

При достаточно малой входной емкости «C_{IN}» напряжение «U_{IN}» на входе микровольтметра практически равно измеряемому значению ЭДС «ΔU».

Вычисления напряженности переменного электрического поля могут быть сделаны с помощью простой формулы, приведенной ранее для заземленной приемной линии. При выборе рабочей частоты приходится учитывать следующие противоречивые требования.

3.3. Измерение электрического поля в воздухе





$$\lim_{f \to 0} U_{in} = 0$$

$$\Delta U = \varphi_M - \varphi_N$$

$$\lim_{f \to f_{max}} U_{in} = \frac{\Delta U}{1 + \frac{C_{in}}{C_N} + \frac{C_{in}}{C_M}}$$

Fig.4

С одной стороны, использование низких частот обеспечивает большую глубинность исследований методом сопротивлений.

С другой – чем выше рабочая частота, тем легче обеспечить эффективную защиту от специфических для бесконтактных измерений сигналов-помех, связанных с вибрацией электродов-антенн приемной линии.

Вибрационные помехи на входе микровольтметра обусловлены электризацией изоляционных покрытий проводов приемной линии. Эти помехи имеют значительную амплитуду импульсов и существенно низкочастотный спектр.

Выполненные исследования определили оптимальную полосу частот 20-3000 Гц. При разработке аппаратуры «ЭРА» в качестве основной была выбрана частота 625 Гц, обеспечивающая бесконтактное возбуждение и измерение электрического поля.

4.1. Аномальные электрические поля в воздухе

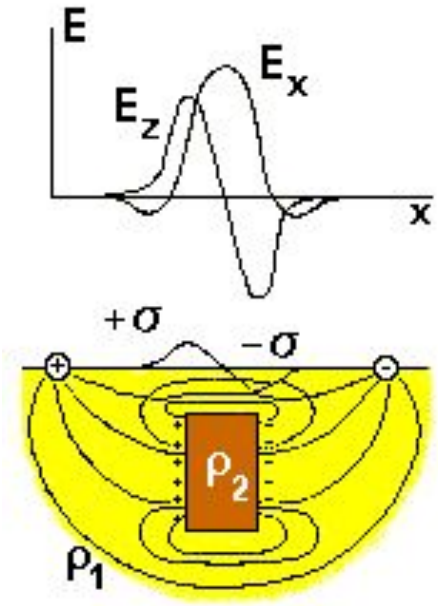


Fig.5

Остановимся на природе аномальных электрических полей в воздухе, наблюдаемых при работах по методике бесконтактных измерений электрического поля (БИЭП).

На Fig.5 показан ограниченный на глубину вертикальный пласт высокого удельного сопротивления, являющийся причиной аномального поля. Пласт находится в нормальном электрическом поле с горизонтальной поляризацией. Вследствие этого вертикальные стороны пласта приобретают стационарные электрические заряды разных знаков.

Это вызывает в земле аномальные электрические токи, которые не должны проникать в изолятор (воздух). Поэтому на границе земля-воздух формируются статические электрические заряды, препятствующие протеканию электрического тока из земли в воздух.

Распределение этих зарядов полностью определяется аномальными токами в земле. В свою очередь наблюдаемое в воздухе электрическое поле статических зарядов отражает наличие в земле аномального объекта.

4.2. Аномальные электрические поля в воздухе

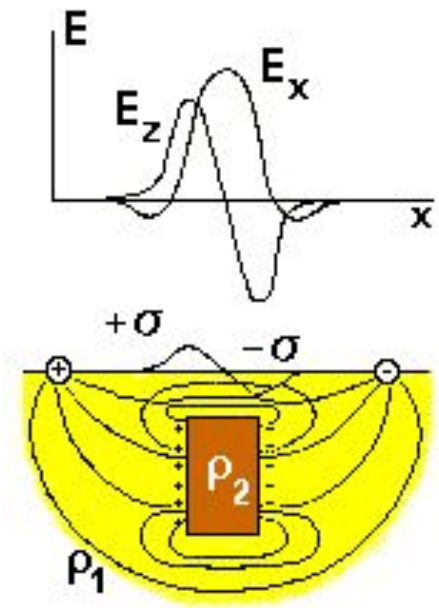


Fig.5

На Fig.5 показаны графики горизонтальной «E_X» и вертикальной «E_Z» составляющих аномального электрического поля в воздухе вблизи поверхности раздела сред земля-воздух.

Нетрудно заметить, что эти кривые аналогичны графикам горизонтальной «H_X» и вертикальной «H_Z » составляющих аномального магнитного поля над вертикальным пластом, намагниченным в земном поле с горизонтальной поляризацией (вблизи экватора).

5.1. Технология и оборудование

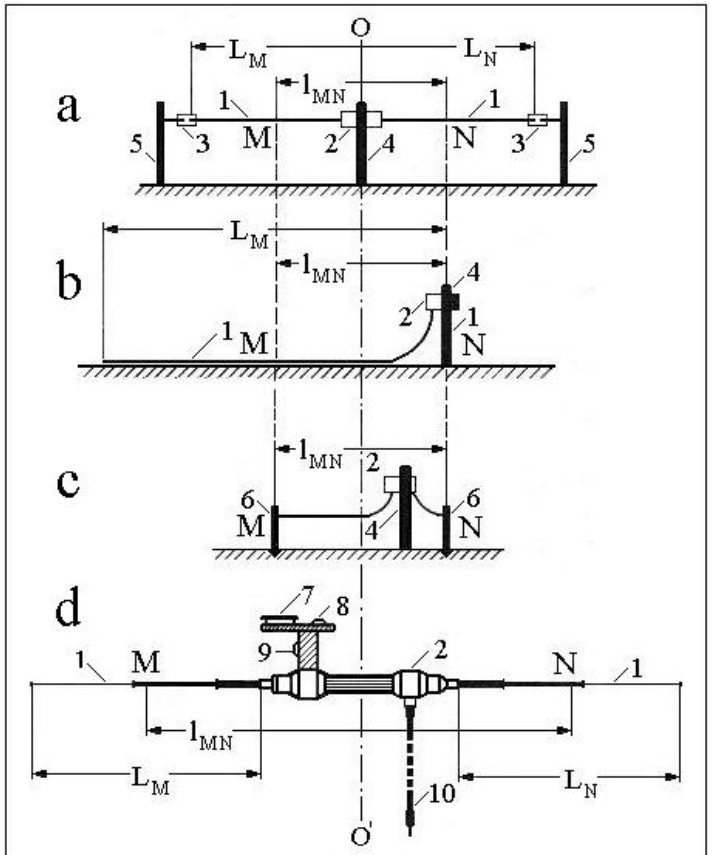


Fig.6

При работах по методике БИЭП используются приемные незаземленные линии, показанные на Fig.6. В зависимости от требуемой детальности исследований они имеют разные длины и различную конструкцию.

Например, на Fig.6b представлена асимметричная стелющаяся приемная линия, выполненная из изолированного провода длиной 10-100 м. Эффективная длина телескопической воздушной антенны (Fig.6d) может быть выбрана в диапазоне 0.5-1.5 м.

5.2. Технология и оборудование

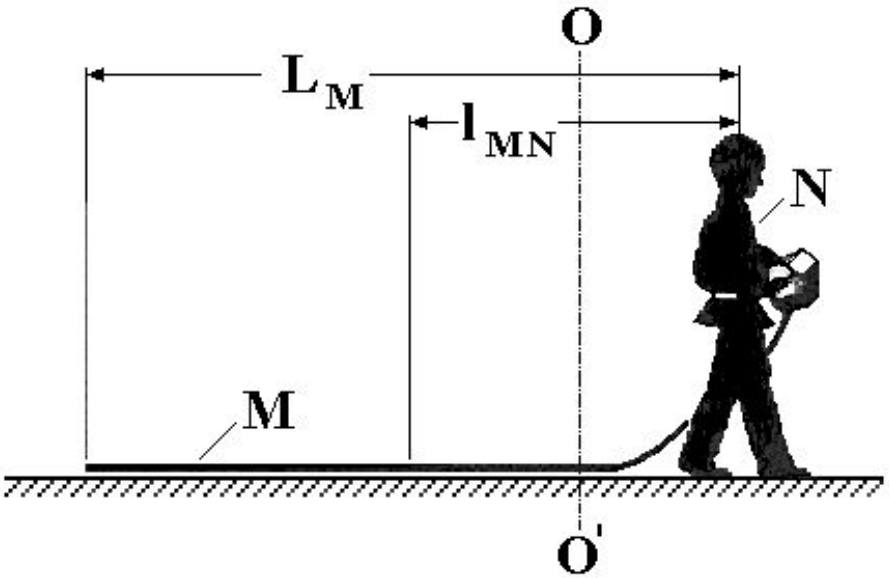


Fig.7

При использовании стелющейся приемной линии в качестве одного из приемных электродов может выступать оператор (Fig.7), переносящий микровольтметр. В этом случае клемма «N» микровольтметра соединяется с металлическим браслетом, закрепленным на руке оператора.

5.3. Технология и оборудование

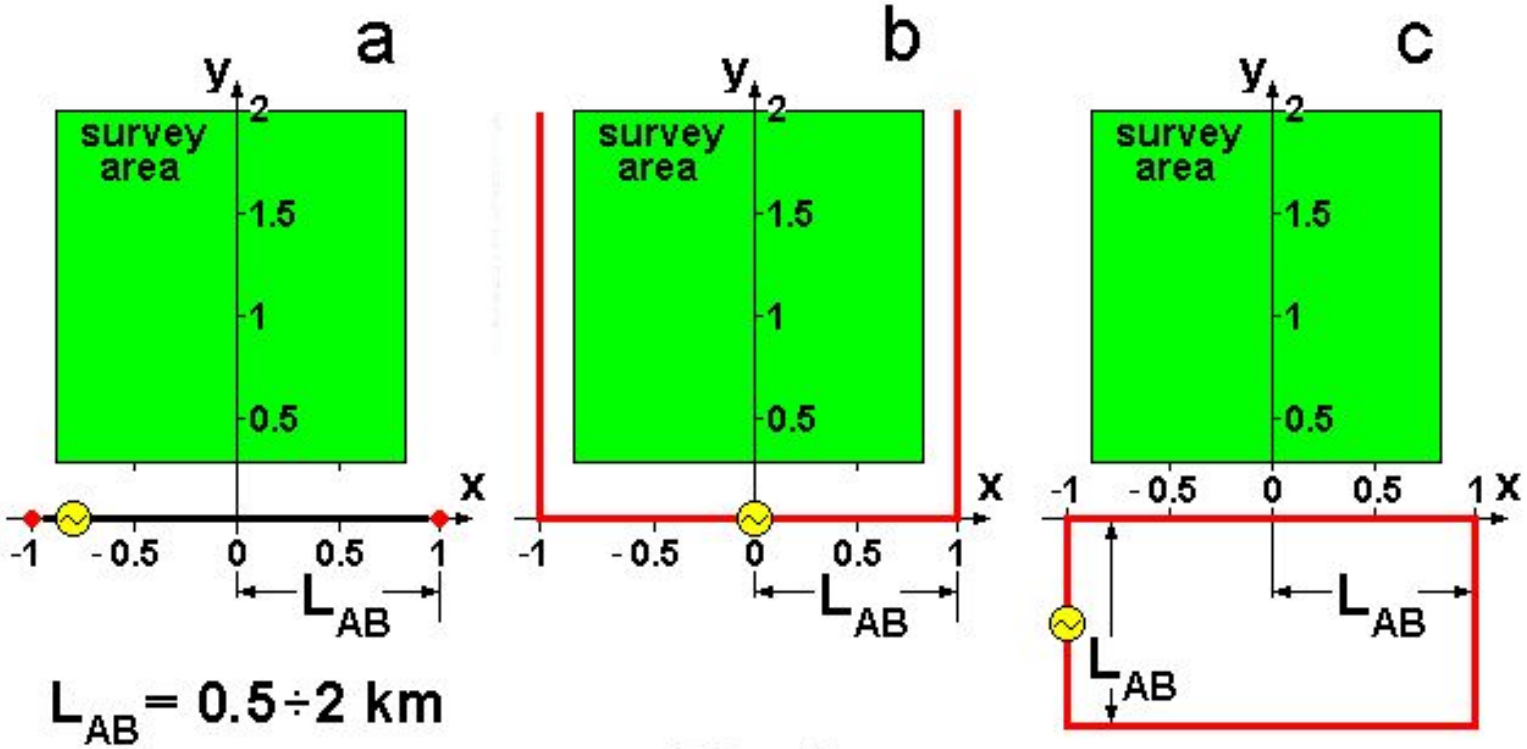


Fig.8

На Fig.8 показаны схемы питающих линий установок градиента: a – обычная установка с заземленными питающими электродами; b, c – незаземленные установки: b – «емкостная» (незамкнутая петля), c - «индуктивная» (замкнутая петля).

5.4. Технология и оборудование

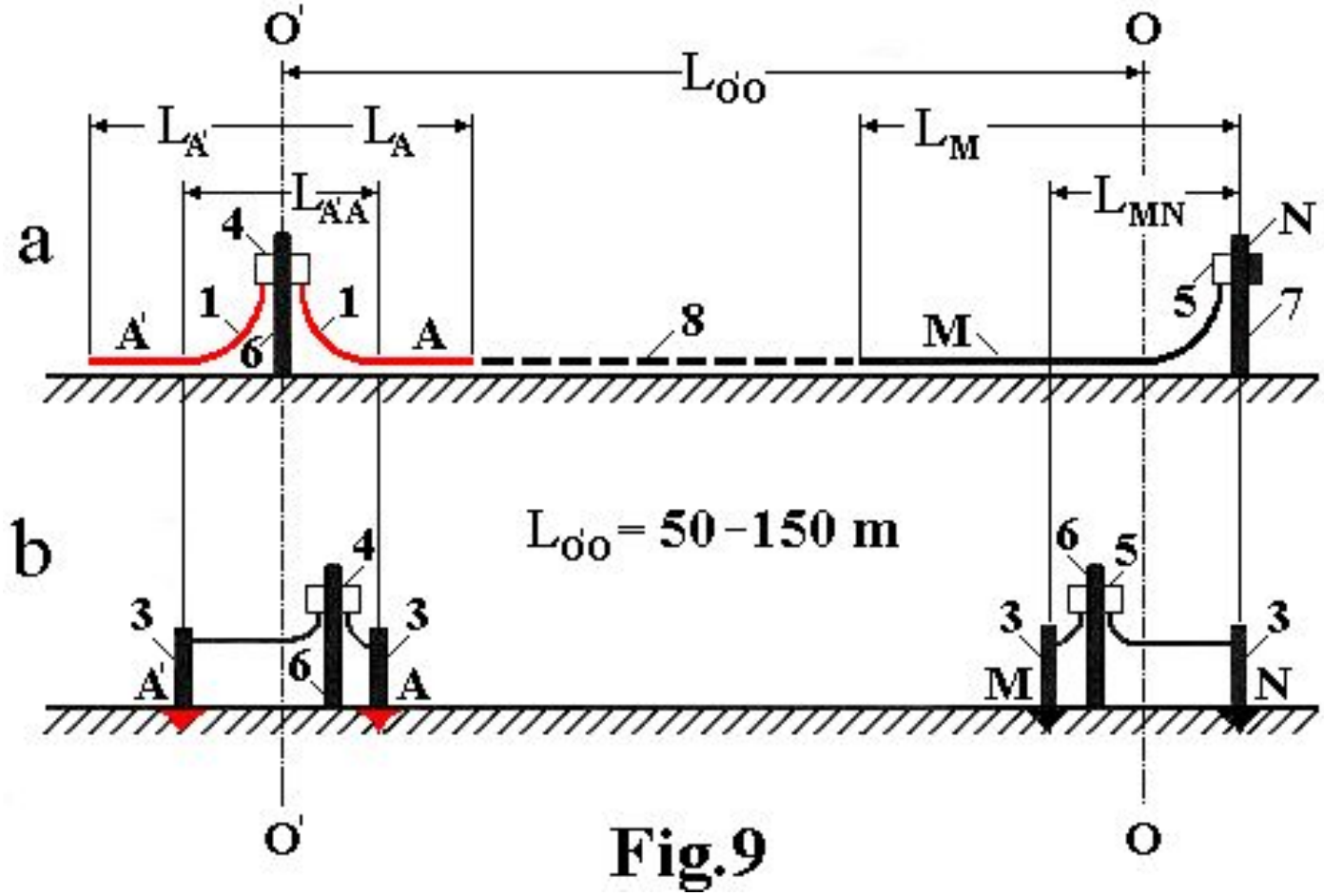


Fig.9

На Fig.9 сопоставлены конструкции заземленной (a) и незаземленной (b) дипольно-осевых установок: «A'A» – питающие линии; «MN» – приемные линии. Для работ с незаземленной установкой вместо 4-х достаточно двух человек.

5.5. Технология и аппаратура

Fig.10

Для работ по методике БИЭП автором и под его руководством разработано и выпущено несколько серий аппаратуры - «БИКС-75», Электро-Разведочная Аппаратура «ЭРА-625» и «ЭРА-В» (общее количество комплектов более 300).

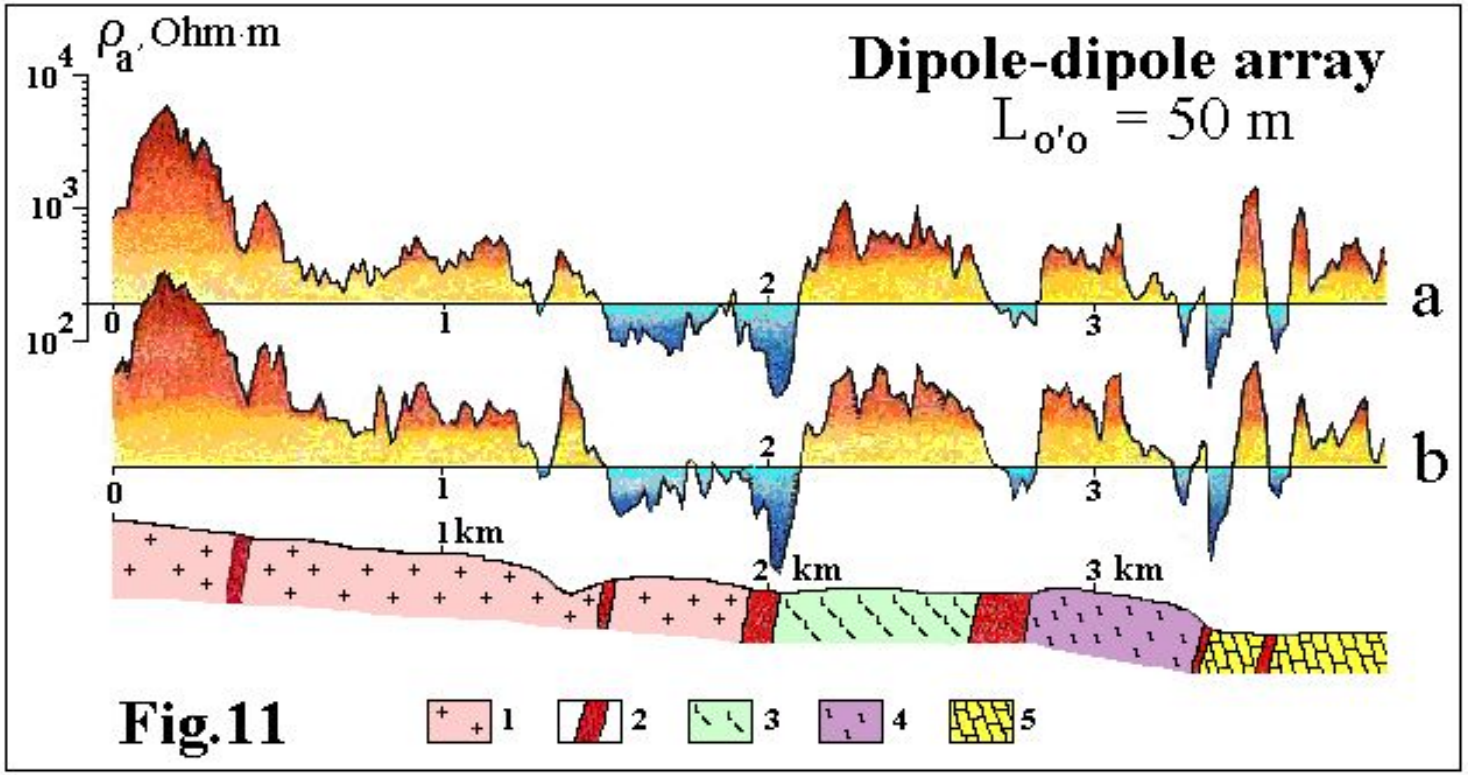
Частотный диапазон аппаратуры «ЭРА-В»: 0, 4.88, 625 Гц, диапазон измерений: 3 мкВ-2000 мВ, выходное напряжение генератора до 1.5 кВ. В комплект аппаратуры входят «активные электроды» (в виде отдельных блоков и в составе воздушной антенны) с входной емкостью 0.1 пФ и входным сопротивлением 20 ГОм).

На Fig.10 показана последняя версия аппаратуры «ЭРА» - «ЭРА-МАКС» разработанная Л.И. Дукаревичем и выпускаемая под его руководством научно-производственным предприятием НПП «ЭРА».

6.1. Примеры работ в полевых и городских условиях

- Метод сопротивлений без заземлений, предложенный автором в 1963 г., успешно использовался в СССР и работает в России при геологическом картировании, в гидрогеологии и инженерной геологии, при геоэкологических и археологических исследованиях.
- В 1981 г. методика БИЭП утверждена для применения на территории СССР министерством геологии. Аппаратура и методика БИЭП отмечены 2-мя серебренными медалями ВДНХ.
- Новая технология существенно повышает возможности методов сопротивлений и заряда. Она применяется в вариантах профилирования (дипольная и градиентная установки), зондирования, 3-х мерных векторных измерений с вращающимся электрическим полем и др. Преимущества технологии:
- повышение эффективности методов сопротивлений и заряда в областях с неблагоприятным поверхностным покровом: каменные осыпи («курумы»), сухие пески, снежно-ледовый покров, асфальтовые и бетонные покрытия;
- сокращение затрат труда при уменьшении состава полевых бригад;
- расширение потенциальных возможностей методов за счет использования векторных измерений электрического поля в воздухе.

6.2. Примеры полевых работ



На Fig.11 сопоставлены графики кажущихся сопротивлений зазем-ленной (a) и незаземленной (b) дипольно-осевых установок. Саяны, 1975 г.: 1, 3, 4 – метаморфические породы, 2 – тектонические зоны, 5 – известняки.

6.3. Примеры полевых работ

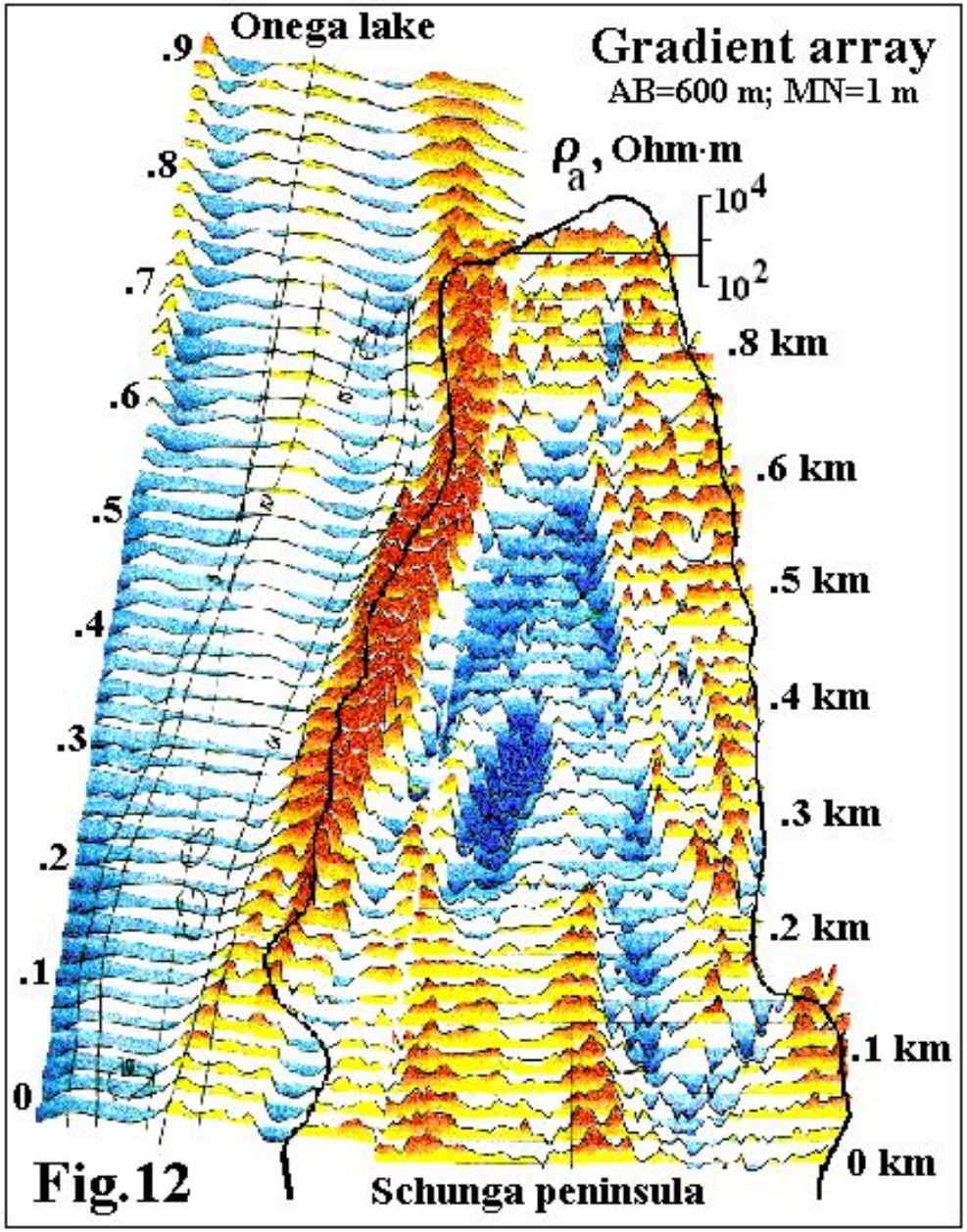


Fig.12

На Fig.12 представлены зимние и летние электроразведочные работы методом сопротивлений с установкой срединного градиента.

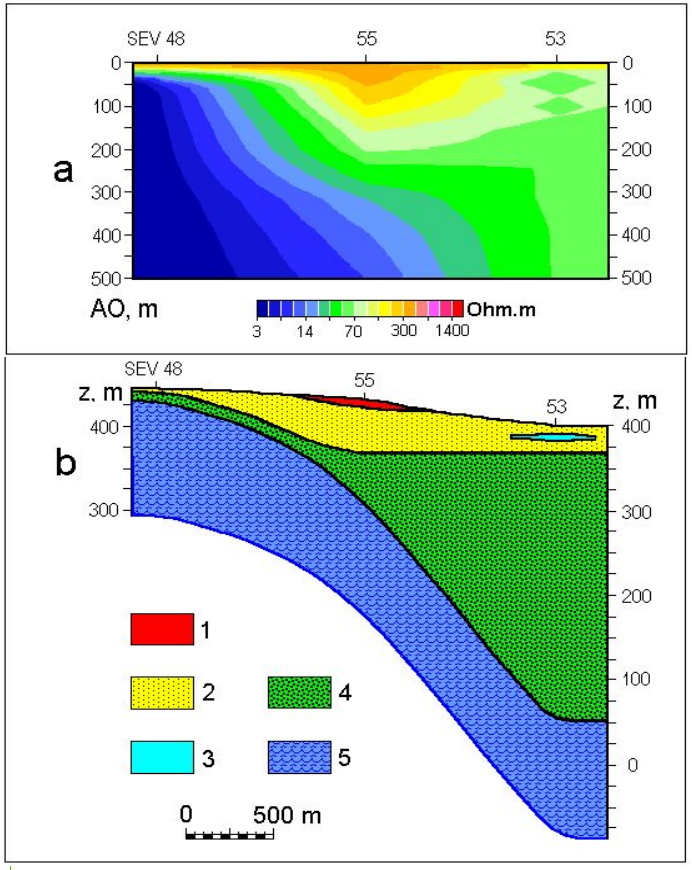
Приемная линия «MN» – воздушная антенна с эффективной длиной 1 м. Длины питающих линий «AB» – 600 м.

Зимняя съемка выполнена по льду Онежского озера.

Центральная Карелия, 1980 г.

Новая установка ВЭЗ
для малых и средних глубин (1-2000 м)

Журнал “Геоэкология, инженерная геология, гидрогеология, геокриология”, 2005, № 5, p.p.454-462
Стандартная интерпретационная программа IPI2WIN (МГУ, Бобачев А.А.)

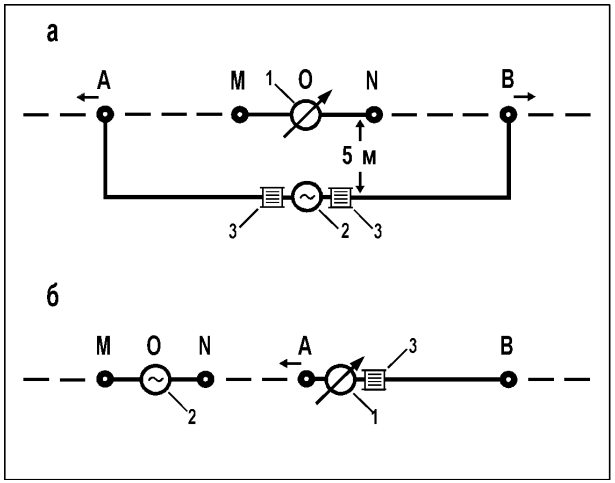


Интерпретация ВЭЗ (новая установка)
Испания, Эль Сальтадор

a – разрез “$\rho_к$”; b – геоэлектрический разрез;
1 – сухие четвертичные отложения, 1500 Омм;
2 – конгломераты зоны аэрации, 300 Омм;
3 – глины, 20 Омм;
4 – водонасыщенные конгломераты, 50÷60 Омм;
5 – мергель (водоупорный слой), 5÷7 Омм.

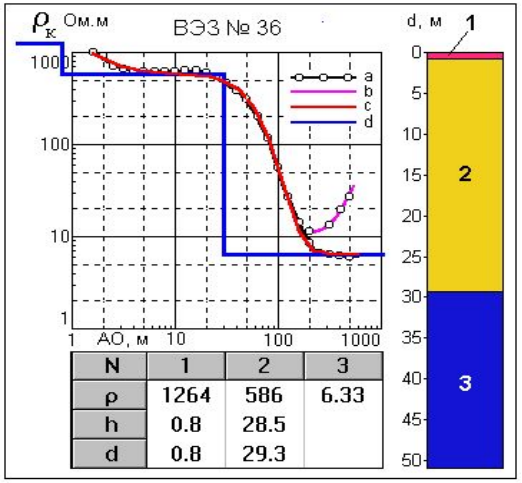
Особенности

- ***высокая степень защиты измерений от индукционной и емкостной помехи***
- ***малые размеры и большая детальность съемки (длина новой установки почти в два раза меньше симметричной)***
- ***увеличение производительности съемки (перемещается только приемный электрод “M”, все другие электроды заземляются только один раз)***
- ***малая численность полевой бригады (1-2 человека вместо 3)***
- ***возможность бесконтактных измерений (при плохих условиях заземлений)***



Схемы установок ВЭЗ

a – симметричной, b – новой (с **генератором** в линии MN), 1 – измеритель, 2 – генератор, 3 – электроразведочная катушка с проводом

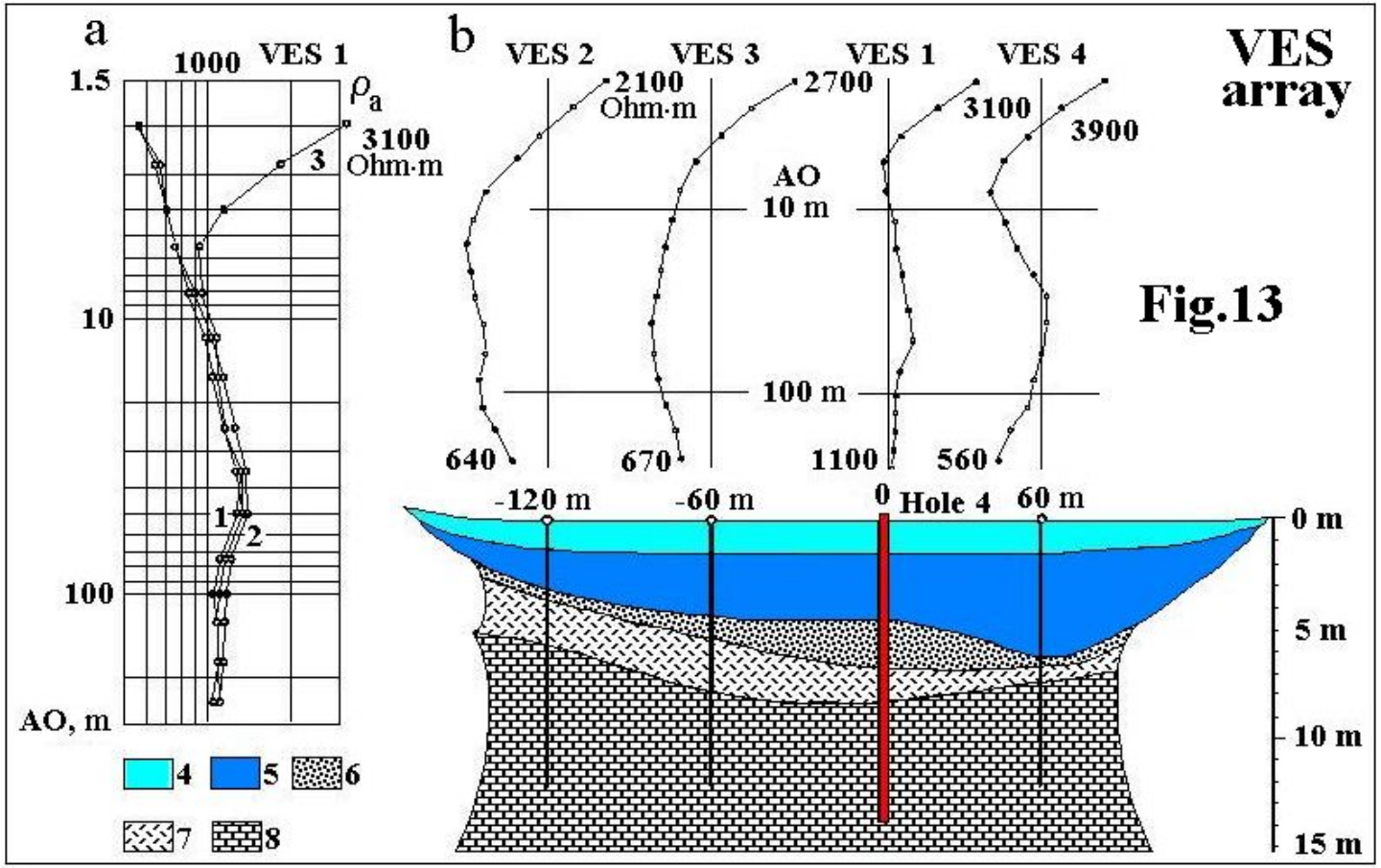


N	1	2	3
ρ	1264	586	6.33
h	0.8	28.5	
d	0.8	29.3	

Индукционные помехи с новой и симметричной установками ВЭЗ

Экспериментальные (a, b) и теоретические (c) кривые ВЭЗ: a, c – новая установка (помехи отсутствуют); b – симметричная установка (значительные помехи искажают интерпретацию); c – теоретическая кривая ВЭЗ (новая установка); d – параметры 2-х слойного геоэлектрического разреза; 1, 2 – сухой (1) и влажный (2) аллювий; 3 – мергель (водоупорный слой)

6.4. Примеры полевых работ



На Fig.13 показаны результаты зондирований с заземленными и незаземленными установками ВЭЗ при выборе створа плотины Чагаянской ГЭС на р. Зея: а – сравнение кривых ВЭЗ для различных частот и установок; b – профиль ВЭЗ с геологическим разрезом. Амурская область, 1996 г. 1- лед, 2- вода, 3 – аллювий, 4 – элювий, 5 – известняки.

6.5. Примеры работ в городских условиях

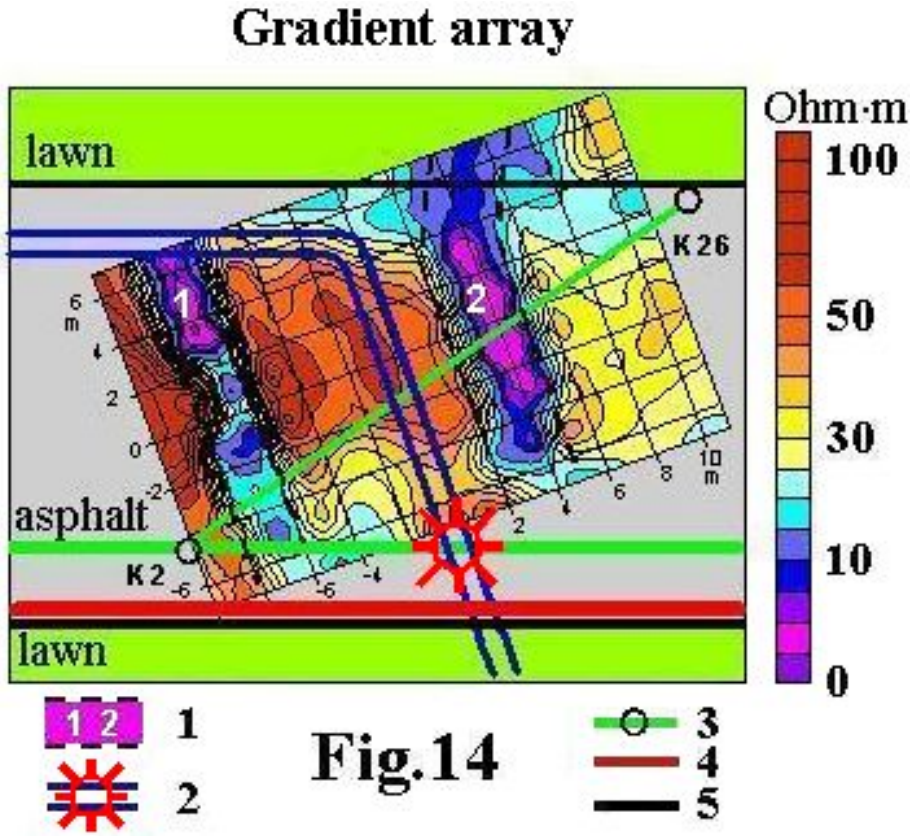


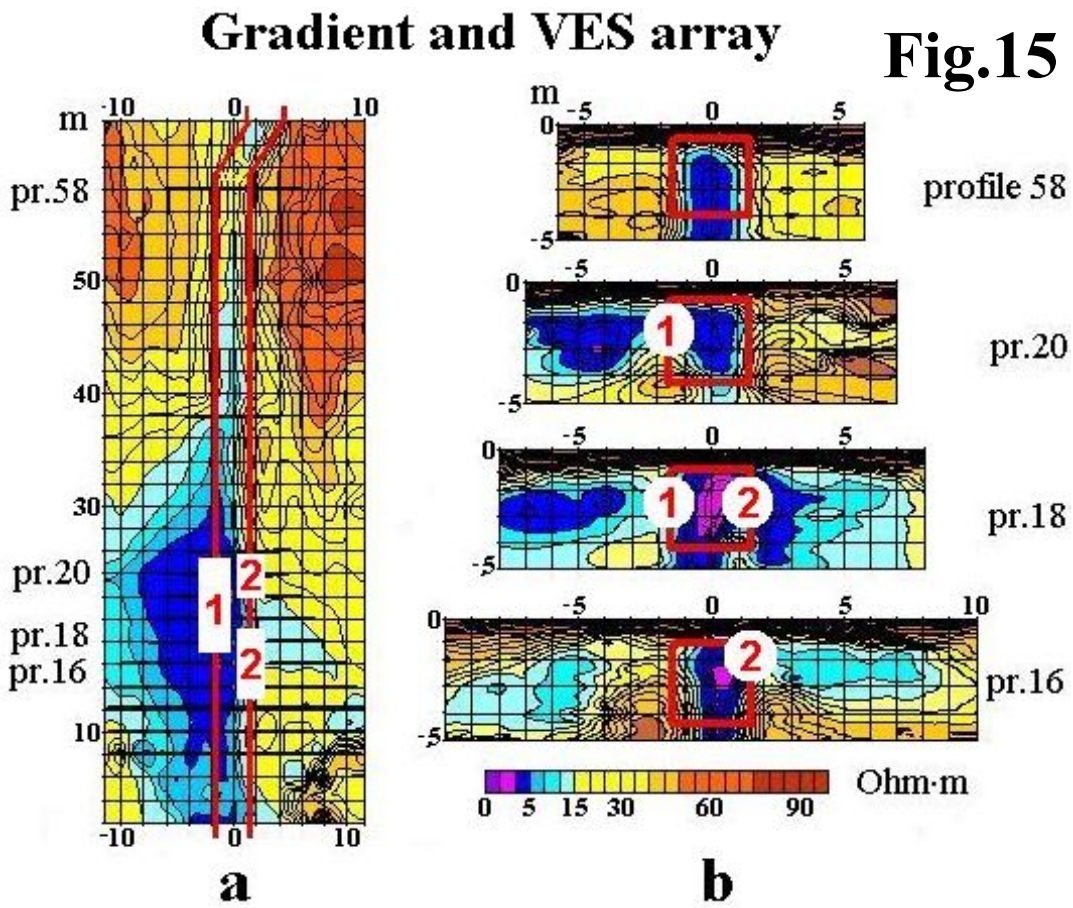
Fig.14

На Fig.14 изображена карта кажущихся удельных сопротивлений дорожного покрытия городского проспекта в зоне аварийной утечки водопроводной линии высокого давления (диаметр водовода 1 м). Основной поток изливающейся воды проходил по железобетонному коробу городской теплотрассы.

Однако, метод сопротивлений показал, что часть водного потока прошла под асфальтовым покрытием в виде 2-х рукавов водонасыщенного грунта (зоны 1, 2). Санкт-Петербург, 1999 г.

1- зоны водонасыщенного грунта; 2 – водовод с локализацией утечки; 3 – линия канализации; 4 – теплотрасса; 5 – поребрик тротуара.

6.6. Примеры работ в городских условиях

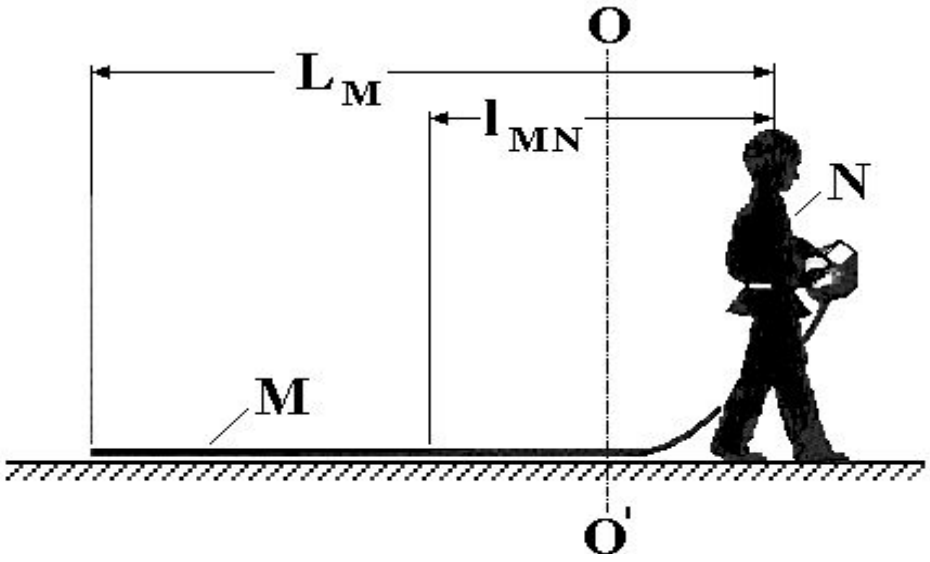


На Fig.15 представлены результаты работ с заземленными установками по локализации мест протечек подземного бетонного канала сброса сточных вод. Длина канала более 60 м, сечение 3x3 м^2, глубина до верхней кромки 1 м. Область утечки (Fig.15a) установлена по данным метода срединного градиента как область низких значений кажущихся сопротивлений (0.5-15 Ом.м).

Места протечек в западной и восточной стенках канала определены с помощью ВЭЗ. Разрезы кажущихся сопротивлений ВЭЗ для внешней (pr.58) и внутренней (pr. 20, 18, 16) зоны области утечки показаны на Fig.15b.

На этом примере видно, что при изучении малых глубин метод сопротивлений является вполне достойным конкурентом георадиолокации.

7. Заключение



Метод сопротивлений без заземлений - реальность! Он живет и работает в России уже более 30 лет.