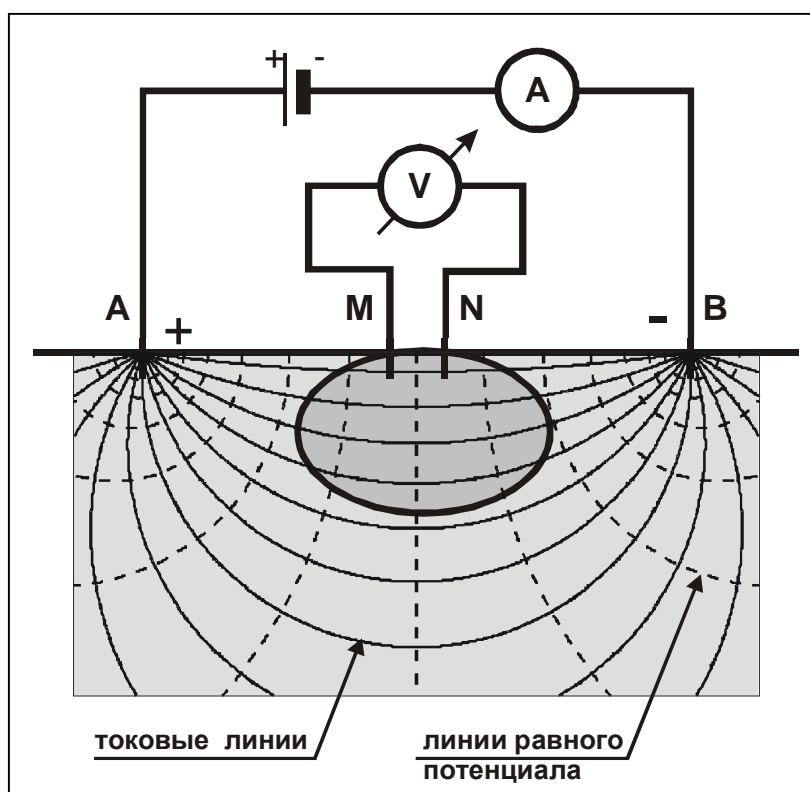


# ВЕРТИКАЛЬНОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ



Учебное пособие

для студентов, обучающихся по направлению «Геология»

Москва, 2013

Под редакцией д.т.н. проф. Модина И.Н.

Автор Марченко М.Н.

Рецензенты: д.г.-м.н., проф. Хмелевской В.К.  
д.ф.-м.н., проф. Шевнина В.А

Допущено УМС геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова в качестве учебного пособия для студентов, обучающихся по направлению «Геология»

Настоящее учебное пособие предназначено для студентов, обучающихся по направлению «Геология», может применяться для обучения в рамках курса «Геофизические методы исследования» и на учебных геологических практиках.

Пособие создано с целью продемонстрировать физические основы метода ВЭЗ, условия его применения и ограничения использования. При этом подразумевается, что освоение материала по ВЭЗ поможет слушателям понять особенности и других геофизических методов.

Рассмотрены электрические свойства горных пород, методика проведения полевых работ, технология обработки и способы интерпретации данных, даны сведения об электроразведочной аппаратуре. Приведены справочные материалы по программе IPI2WIN одномерной интерпретации кривых ВЭЗ.

## Содержание

Электрические свойства горных пород -----	2
Физические основы метода ВЭЗ-----	4
Эффект зондирования-----	5
Пример 2-х слойной кривой ВЭЗ-----	7
Пример 3-х слойной кривой ВЭЗ-----	8
Аппаратура и оборудование метода ВЭЗ -----	9
Помехи при выполнении наблюдений методом ВЭЗ -----	10
Контрольные наблюдения и погрешности наблюдений методом ВЭЗ -----	10
Зондирование и профилирование -----	11
Прямая и обратная задачи-----	12
Решение обратной задачи ВЭЗ методом подбора-----	12
Эквивалентность моделей-----	14
Применение ВЭЗ в комплексе с бурением -----	15
Интерпретация кривых ВЭЗ в программе IPI2WIN -----	18
Разрез кажущегося сопротивления -----	19
Интерпретация (подбор) кривых ВЭЗ -----	20
Результат интерпретации -----	20
Список геофизических терминов и понятий-----	21
Рекомендованная литература -----	28

Метод вертикального электрического зондирования (ВЭЗ) является одним из старейших методов электроразведки. Первые применения метода относятся к 20-м г.г. XX века. Сравнительная простота и наглядность ВЭЗ привела к его широкому распространению во всем мире.

На сегодняшний день электрические зондирования остаются одним из самых применяемых электроразведочных методов. На основе ВЭЗ разработаны и другие современные технологии электроразведки методом сопротивлений – например, электротомография, базирующиеся на тех же принципах, что и «классические» электрические зондирования.

### Электрические свойства горных пород

Одним из основных требований к применению геофизических методов является контрастность по физическим свойствам объекта изучения относительно вмещающей среды. Для электроразведки методами сопротивлений, к которым относится ВЭЗ – это означает, что изучаемый объект (тело, слой, пласт и пр.) должен заметно (желательно в несколько раз) отличаться по удельному электрическому сопротивлению от вмещающих пород.

**Удельное электрическое сопротивление (УЭС)** горных пород является параметром вещества, характеризующим его способность пропускать электрический ток при возникновении электрического поля.

УЭС является подобием понятия электрического сопротивления в электротехнике и измеряется в **Ом·метрах**.

Горные породы принято рассматривать в геофизике как трехфазную среду, т.е. сочетание твердого минерального скелета, в котором присутствуют трещины или поры, заполненные газом и жидкостью. В любой самой прочной и плотной на вид породе присутствуют либо **поры** (в частности, для терригенных отложений) либо **трещины** (в частности, для магматических и метаморфических пород), либо и то и другое. Именно эти поры или трещины, заполненные полностью или частично влагой, в большинстве случаев являются проводниками электрического тока.

Удельное электрическое сопротивление (УЭС) горных пород, в основном, зависит от следующих факторов:

- **удельное электрическое сопротивление породообразующих минералов**
- **пористость (трещиноватость)**
- **влагонасыщенность**
- **удельное электрическое сопротивление поровой влаги** (напрямую связано с соленостью подземных вод и температурой)

**- глинистость**

Рассмотрим эти факторы подробнее.

Удельное электрическое сопротивление породообразующих минералов, как правило, слабо влияет на УЭС породы в целом. Это связано с тем, что подавляющее большинство минералов являются диэлектриками и практически не проводят электрический ток. Исключением являются (кроме глин) сплошные и прожилковые руды минералов проводников – самородных элементов, сульфидов, но такие образования встречаются редко.

Связь УЭС горных пород с коэффициентом пористости (трещиноватости), коэффициентом влагонасыщенности и электрическим сопротивлением поровой влаги очевидна: чем больше жидкости в породе (т.е. чем больше пористость и влагонасыщенность) и чем ниже УЭС жидкости – тем ниже и УЭС горных пород. Например, сухие пески будут обладать более высоким УЭС, чем влажные, а последние более высоким, чем водонасыщенные. При этом уровень, ниже которого УЭС горной породы (не содержащей глинистого материала) не может опуститься – является УЭС воды, насыщающей породу (рис. 1).

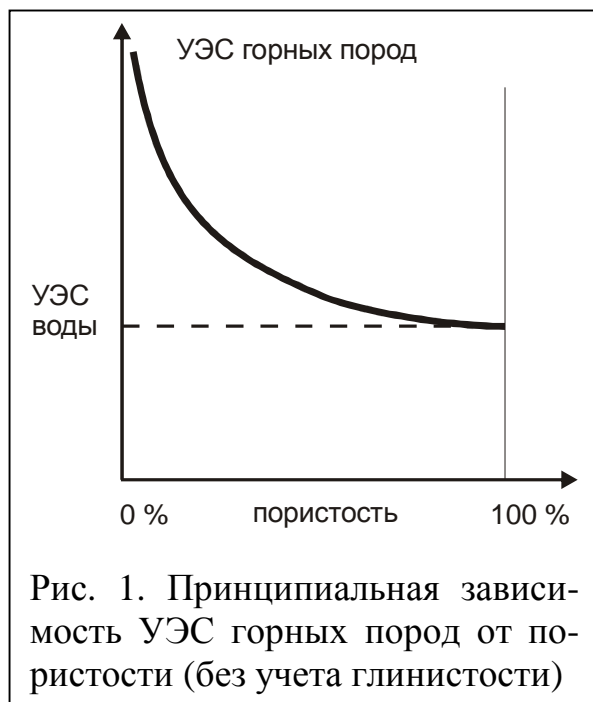


Рис. 1. Принципиальная зависимость УЭС горных пород от пористости (без учета глинистости)

Удельное электрическое сопротивление воды, насыщающей породу, зависит в основном от солености и температуры. Чем больше соленость, тем ниже УЭС воды. С температурой еще проще: вода – провод-



Рис. 2. Условная шкала типичных значений УЭС различных горных пород

ник, лед – изолятор. Мерзлые горные породы обладают очень высокими значениями УЭС.

Отдельный вопрос с глинистостью – глины обладают очень низкими УЭС, значительно ниже, чем у воды. Например, в московском регионе УЭС воды – 25-30 Ом·м, а сопротивление юрских глин – 10-15 Ом·м. Этот эффект связан со сложными электрохимическими процессами, протекающими в капиллярах глинистых пород на границе твердой и жидкой фазы. Чем больше глинистость горных пород, тем ниже УЭС.

Как видно, удельное электрическое сопротивление разных горных пород сильно различается – от долей Ом·м до десятков тысяч Ом·м (рис. 2). Что дает возможность геофизикам-электроразведчикам распознавать различные горные породы и решать задачи:

- разделения осадочных терригенных пород по литологическому составу;
- поиска и разведки грунтовых вод;
- картирования мерзлых грунтов;
- поиска зон развития карста в карбонатных породах;
- и многого другого.

### Физические основы метода ВЭЗ

Идея метода ВЭЗ проста. На поверхности земли собирают *электро-разведочную установку*, которая, как правило, состоит из двух питающих и двух приемных электродов (рис. 3). В качестве электродов обычно применяют металлические штыри, которые забиваются в землю. **Питающие электроды** принято обозначать буквами **А** и **В**, **приемные** – **М** и **Н**.

К питающим электродам с помощью проводов подсоединяют *источник тока* – батарею или специальный генератор. В земле возникает электрическое поле и начинает протекать электрический ток. Силу тока в питающей линии ( $I_{AB}$ ) измеряют с помощью *амперметра*, включенного в цепь АВ.

На приемных электродах М и Н возникает разность электрических потенциалов

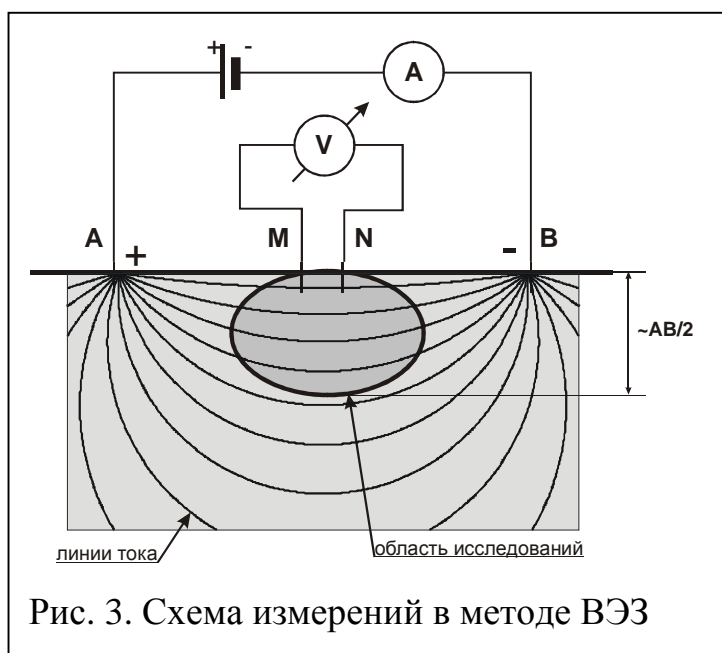


Рис. 3. Схема измерений в методе ВЭЗ

( $\Delta U_{MN}$ ), которая измеряется с помощью *вольтметра*.

По результатам измерений можно судить об электрических свойствах горных пород на глубинах проникновения тока в землю. Глубина «погружения тока» зависит, в основном, от расстояния между питающими электродами А и В.

По результатам выполненных измерений вычисляют **кажущееся удельное электрическое сопротивление (КС)**, обозначаемое  $\rho_k$ , и измеряемое в Ом·м:

$$\rho_k = K \cdot \frac{\Delta U_{MN}}{I_{AB}},$$

где К – геометрический коэффициент (зависит от взаимного расположения и расстояний между электродами А, В, М и N),  $\Delta U_{MN}$  – разность потенциалов на приемных электродах М и N,  $I_{AB}$  – сила тока, протекающего в питающей линии.

**Кажущееся электрическое сопротивление** характеризует интегральное значение УЭС горных пород в области исследования. Область исследования располагается под центром установки и простирается от поверхности до глубины, примерно равной половине длины установки -  $AB/2$  (см. Рис. 3).

Если изучаемая среда однородна (с УЭС равным  $\rho_{\text{среды}}$ ) - то значение полученного кажущегося сопротивления  $\rho_k$  будет тождественно равно  $\rho_{\text{среды}}$ :  $\rho_k \equiv \rho_{\text{среды}}$ .

Если изучаемая среда неоднородна, т.е. в области исследования располагаются горные породы с различными значениями УЭС, то значение полученного кажущегося сопротивления  $\rho_k$  будет больше наименьшего из УЭС пород, но меньше наибольшего:  $\rho_{\text{min}} < \rho_k < \rho_{\text{max}}$ .

### Эффект зондирования

Для выполнения зондирования производят серию измерений, постепенно увеличивая размер питающей линии АВ. Чем больше параметр  $AB/2$  – тем глубже «погружается ток в землю» и тем больше глубинность исследований (рис. 4).

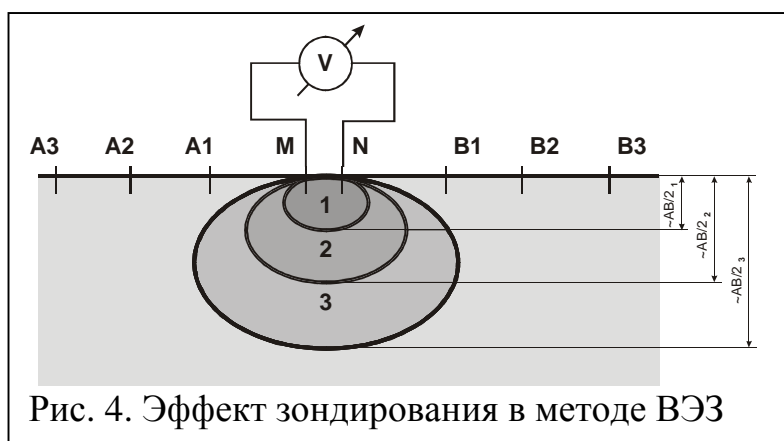


Рис. 4. Эффект зондирования в методе ВЭС

При этом каждая следующая область исследования полностью включает в себя предыдущую.

Значения  $AB/2$  выбирают в зависимости от требуемой глубинности исследований. Как правило, *минимальные*  $AB/2$  принимают 1-1.5 метра. *Максимальные*  $AB/2$  редко делают больше первых километров. Таким образом, метод ВЭЗ применяют для изучения сред до глубин не более чем сотни метров.

В результате описанной серии измерений получается набор значений кажущегося сопротивления, измеренных при разных значениях  $AB/2$ . В электроразведке параметр  $AB/2$  называют *разносом питающей линии* (или просто *разносом*).

Для удобного представления результатов наблюдений строят *график зависимости  $\rho_k$  (в Ом·м) от разноса (в м)*. Такой график называется *кривой зондирования* или *кривой ВЭЗ*.

Кривые зондирования принято строить не в обычном (линейном) масштабе, а на *билогарифмических* бланках. По обеим осям такого бланка значения  $\rho_k$  (Ом·м) и  $AB/2$  (м) откладываются в *логарифмических* масштабах (рис. 5).

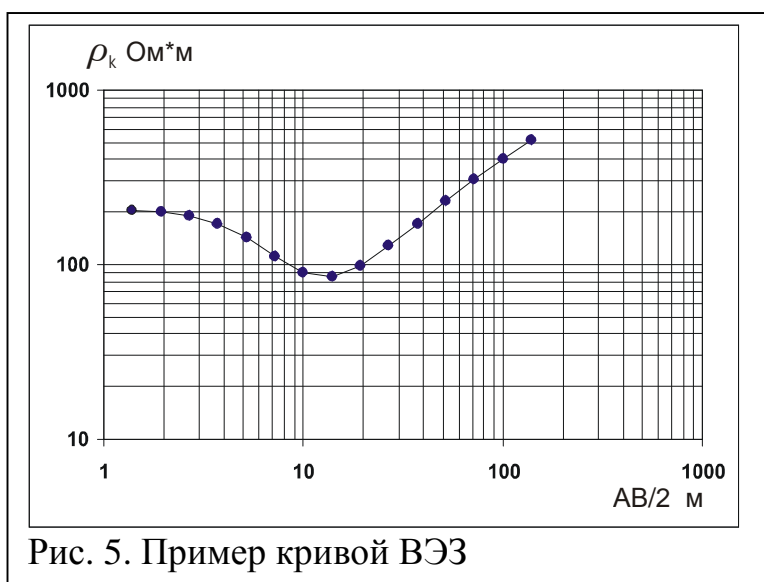


Рис. 5. Пример кривой ВЭЗ

*Кривая ВЭЗ качественно отображает изменения УЭС горных пород с глубиной* – малые разносы на графике отвечают малым глубинам, чем больше разнос, тем больше глубинность исследования. В данном случае, на рисунке 5 изображена 3-х слойная кривая ВЭЗ.

Рассмотрим примеры кривых ВЭЗ над различными геологическими разрезами.



## Пример 2-х слойной кривой ВЭЗ

Рассмотрим случай выполнения наблюдений методом ВЭЗ в районе г. Днепропетровска (Украина). Днепропетровск располагается на территории украинского щита, сложенного гранитоидами. Верхняя часть разреза представлена четвертичными отложениями, в частности лессами (рис. 6).

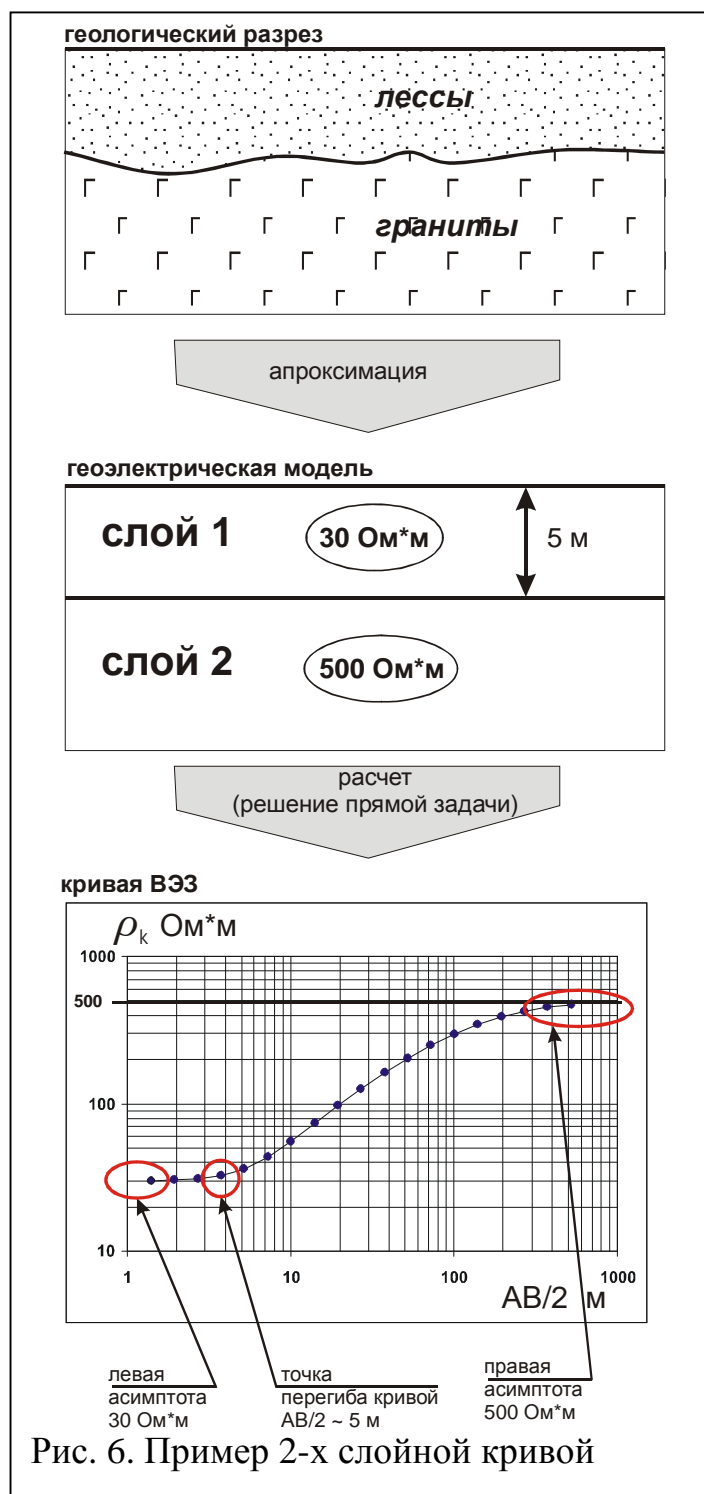
Описанный разрез можно аппроксимировать (т.е. описать в несколько упрощенном виде) двухслойной *геоэлектрической моделью*:

- **граниты**, как любые скальные грунты, обладают высокими УЭС – примем значения 500 Ом·м;
- **лессы** – мелкодисперсные осадочные породы с высоким коэффициентом пористости, в обводненном состоянии обладают невысокими УЭС – примем значения 30 Ом·м;
- **мощность лессов** – примем равной 5м.

Рассмотрим кривую ВЭЗ над таким разрезом.

Обычно измерения методом ВЭЗ начинают с разносов  $AB/2$  1-1.5 метра. В этом случае вся область исследования располагается полностью в первом слое и  $\rho_k$  будет точно соответствовать УЭС этого слоя. т.е.  $\rho_k=30$  Ом·м (рис. 7).

При дальнейшем увеличении разноса ситуация повторяется, до тех пор, пока  $AB/2$  не увеличится настолько, что в область исследования попадет граница и верхняя часть второго слоя. Это произойдет на раз-



носах равных приблизительно 5 м. Поскольку второй слой обладает сравнительно высоким сопротивлением, то  $\rho_k$  начнет возрастать (точка перегиба на кривой ВЭЗ).

При дальнейшем увеличении разности  $\rho_k$  будет расти и в итоге асимптотически приблизится к УЭС второго слоя. Но значение  $\rho_k$  даже при очень большом разности не станет равным 500 Ом·м. Это обусловлено тем, что всегда в области исследования будет присутствовать первый слой, вносящий свой вклад в интегральный параметр  $\rho_k$ .

Можно сказать, что  $\lim_{AB/2 \rightarrow \infty} \rho_k = 500$ .

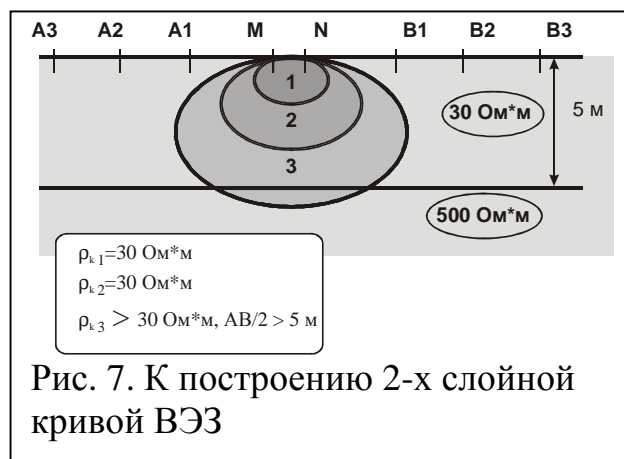
### Пример 3-х слойной кривой ВЭЗ

Рассмотрим географически более близкий к нам случай - выполняются наблюдения методом ВЭЗ в Подмоскowie. Типичный подмосковный разрез можно представить в следующем виде (см. Рис. 8):

- в основании разреза (т.е. до глубин сотни м.) залегают каменноугольные известняки;
- выше по разрезу располагаются юрские глины;
- верхняя часть разреза сложена четвертичными, в том числе ледниковыми отложениями.

Аппроксимируем описанный разрез трехслойной *геоэлектрической моделью*:

- **известняки**, как любые скальные грунты, обладают высокими значениями УЭС, но в отличие от гранитов известняки подвержены карсту, что понижает УЭС – примем 200 Ом·м, это вполне реальные значения;
- **глины**, как уже упоминалось, обладают очень низкими значениями УЭС, в частности, для Подмоскowie характерны значения 10-15 Ом·м – примем 10 Ом·м. Примем мощность глин равной 10 м;



- **четвертичные отложения** – представлены переслаиванием песков, суглинков, супесей, иногда с включениями валунов. Типичные значения УЭС = 50 Ом·м. Примем мощность этих отложений равной 10 м.

По аналогии с предыдущим примером, кривая ВЭЗ начнется (левая асимптота) со значения  $\rho_k$  50 Ом·м, и такие значения КС будут наблюдаться на разносах до примерно 10 метров.

При дальнейшем увеличении разноса  $\rho_k$  начнет уменьшаться (кривая «пойдет» вниз).

Влияние третьего слоя начнется на разносах около 20 м. При дальнейшем увеличении разноса  $\rho_k$  будет расти, и в итоге будет асимптотически приближаться к УЭС основания разреза.

Поскольку мощность глин невелика, то кривая ВЭЗ не приблизится к значению УЭС глин, а на кривой образуется минимум, связанный с влиянием слоя глин.

По аналогии с предыдущим примером -  $\lim_{AB/2 \rightarrow \infty} \rho_k = 200$ .

Таким образом, связь кривой ВЭЗ с изучаемым разрезом вполне логична и поддается пониманию и анализу, исходя из простых соображений и здравого смысла.

### Аппаратура и оборудование метода ВЭЗ

Для выполнения наблюдений методом ВЭЗ применяется специализированная электроразведочная аппаратура для возбуждения поля (генераторы) и измерения разности потенциалов (измерители). В настоящее время, как правило, для метода сопротивлений применяется аппа-

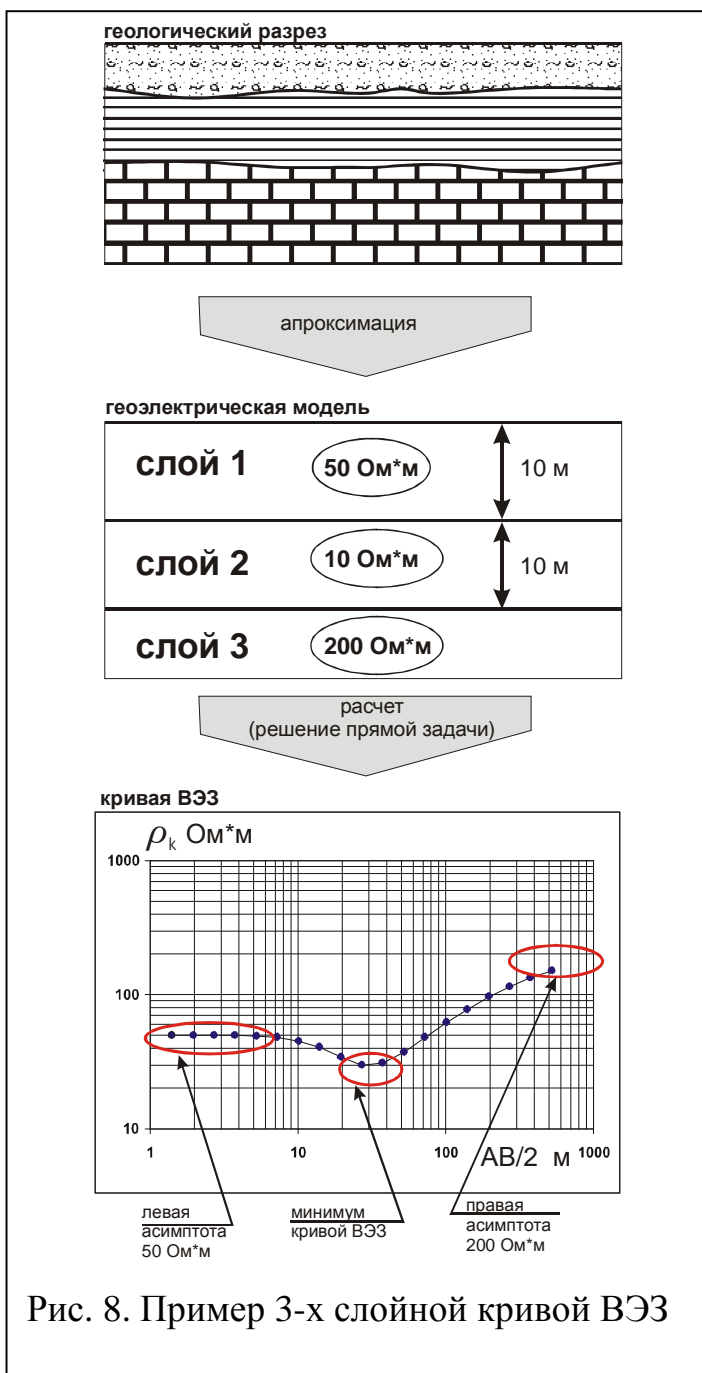


Рис. 8. Пример 3-х слойной кривой ВЭЗ

ратура на ультранизких частотах (1-10 Гц) или на постоянном токе. Среди применяемых отечественных приборов можно назвать следующие образцы:

- АЭ-72 – прибор разработки 60-х гг., работающий на постоянном токе;
- АНЧ-3 – прибор разработки 70-80-х гг., работающий на переменном токе на частоте 4.88 Гц;
- ЭРА – прибор разработки конца 80-х гг., работающий на частотах 0, 4.88 и 625 Гц;
- ЭРА-МАХ – современный прибор, работающий на частотах 0, 4.88, 625, 1250 и 2500 Гц;
- ЭРП-1 – современный прибор, работающий на частотах 0, 1.22, 2.44 и 4.88 Гц;
- генератор АСТРА и измеритель МЭРИ – современные многочастотные приборы, работающие на частотах от 0 до 625 Гц.

Для монтажа питающих и приемных линий применяются сталемедные провода и кабели. В качестве питающих электродов используют стальные заостренные штыри, для приемных – медные или латунные.

### Помехи при выполнении наблюдений методом ВЭЗ

При выполнении измерений приходится сталкиваться с многочисленными помехами. Наиболее значимые из них:

- аппаратные помехи: шумы измерителя, погрешности работы генератора и др.;
- методические погрешности: ошибки в задании разносов АВ, отклонения положений электродов от прямой линии, индукционные наводки и пр.;
- наводки от линий электропередач, электрофицированных железных дорог и т.д.;
- влияние рельефа;
- отклонения изучаемого разреза от горизонтально-слоистого, в т.ч. влияние локальных неоднородностей изучаемого разреза.

Влияние помех приводит к различным искажениям на кривых ВЭЗ. Существуют многочисленные способы борьбы с помехами и наводками.

### Контрольные наблюдения и погрешности наблюдений методом ВЭЗ

Нормативные документы требуют, чтобы погрешность полевых наблюдений методом ВЭЗ не превышала 5%. Это значит, что если выпол-

нить повторные (контрольные) наблюдения в той же точке, что и рядовые измерения, то относительная невязка результатов не должны превышать 5 %.

Объем контрольных наблюдений должен быть не менее 5% от общего объема исследований.

### Зондирование и профилирование

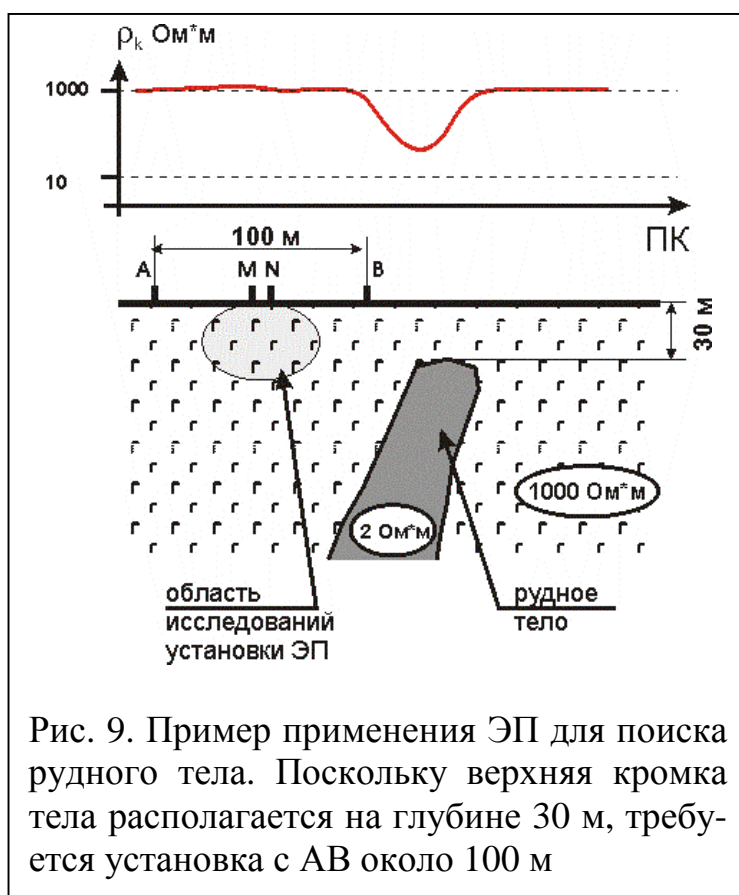
Из физического принципа метода ВЭЗ и приведенных примеров понятно, что данный метод применяется для изучения горизонтально-слоистых сред с небольшими углами наклона границ (до 15-20 градусов).

Если возникает необходимость изучения сильно изменчивых по простиранию разрезов или локальных объектов (интрузивные или рудные тела, разрывные нарушения и т.д.) применяются другие подходы. В частности, для поиска локальных объектов принято применять метод электроразведки – **электропрофилирование (ЭП)**.

Измерения методом ЭП производятся с такой же электроразведочной установкой как в методе ВЭЗ, но только при одном-двух значениях разносов АВ. Установка профилирования перемещается по профилю наблюдений с шагом от 5-10 до 50-100 м, в зависимости от размеров объектов поиска и требуемой детальности съемки.

Фактически ЭП – является «укороченным вариантом ВЭЗ». Величина используемых при профилировании разносов АВ определяется исходя из требуемой глубины исследований (глубины залегания искомого объекта).

Результаты электропрофилирования представляют в виде графиков кажущегося сопротивления вдоль профилей наблюдений (рис. 9).



### Прямая и обратная задачи

Получение кривой зондирования, соответствующей модели (которая аппроксимирует изучаемый разрез), называется **решением прямой задачи ВЭЗ**.

Решение прямой задачи выполняется с помощью компьютерных программ и производится быстро и точно. С математической точки зрения, выполняемые расчеты не представляют особой сложности.

Обратная процедура, т.е. переход от кривой зондирования к соответствующей ей модели разреза называется **обратной задачей ВЭЗ**. Решение обратной задачи значительно труднее прямой. С математической точки зрения говорят о неустойчивости и неоднозначности обратной задачи, что и определяет возникающие сложности при выполнении расчетов.

Существует несколько способов решения обратной задачи ВЭЗ. В рамках данного пособия рассмотрим один из них – **метод подбора**.

### Решение обратной задачи ВЭЗ методом подбора

**Метод подбора** – способ поиска модели строения разреза, подходящей для имеющейся кривой зондирования, когда выбор модели осуществляют путем подбора нужного варианта.

Разберем схему метода по шагам

1. Имеем кривую ВЭЗ, полученную в полевых условиях. Такую кривую принято называть **экспериментальной**.

Нам необходимо подобрать модель среды, которой соответствует такая же кривая (или максимально близкая), как полученная в поле.

2. Выбирается **модель начального приближения** (МНП). Желательно, чтобы МНП была близка к реальной ситуации, как минимум модель не должна явно противоречить кривой ВЭЗ – например, если кажущееся сопротивление растет с увеличением разности (кривая «идет вверх»), то и УЭС слоев должно возрастать с глубиной.

Параметры модели можно представить по-разному:  
в виде таблицы

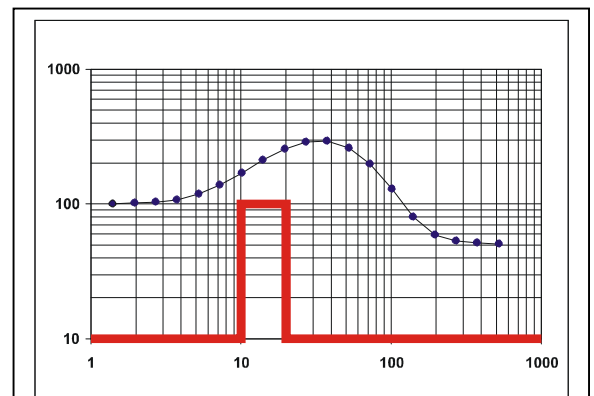


Рис. 10. Экспериментальная кривая ВЭЗ и модель начального приближения

Для нашего примера, можно предложить такую модель начального приближения:

№ слоя	УЭС слоя, Ом·м	Мощность слоя, м
1	10	10
2	100	10
3	10	-

Мощность третьего слоя не указана, поскольку этот слой является основанием разреза, и его мощность считается бесконечно большой.

в виде ломаной линии на том же бланке, что и кривая ВЭЗ (рис. 10).

Для этого по оси кажущихся сопротивлений откладывают УЭС слоев, а по оси  $AB/2$  – глубины границ. В этом случае, на ломаной линии горизонтальные участки отмечают слои с УЭС, а вертикальные участки отмечают положения границ.

3. Для модели начального приближения решается прямая задача - рассчитывается кривая ВЭЗ. Такую кривую принято называть **теоретической** (рис. 11).

4. Производится сравнение двух кривых: **экспериментальной** и **теоретической**. Как правило, кривые сильно различаются.

5. В модель начального приближения вводятся поправки, таким образом, чтобы приблизить рассчитываемую теоретическую кривую к полевой. После каждого корректирования модели рассчитывается новая теоретическая кривая, кривые сравниваются, определяются новые поправки и т.д. (рис. 12)

Задача обработчика – совместить теоретическую (определяемую моделью) и полевую кривую.

В приведенном примере частичного подбора (рис. 12) выполнено три подхода:

- 1 увеличено сопротивление 1-го слоя;
- 2 увеличено сопротивление 2-го слоя;

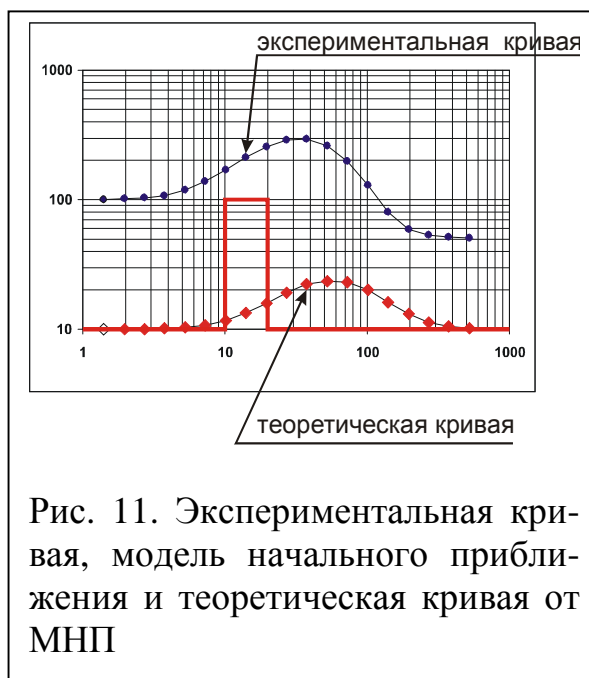


Рис. 11. Экспериментальная кривая, модель начального приближения и теоретическая кривая от МНП

3 первая граница (подошва первого слоя) смещена влево (глубина уменьшена с 10 до 7 м), а также увеличено сопротивление 3-го слоя.

В итоге получена новая модель:

№ слоя	УЭС слоя, Ом·м	Мощность слоя, м
1	80	7
2	500	10
3	50	-

Полученная теоретическая кривая значительно лучше совпадает с экспериментальной.

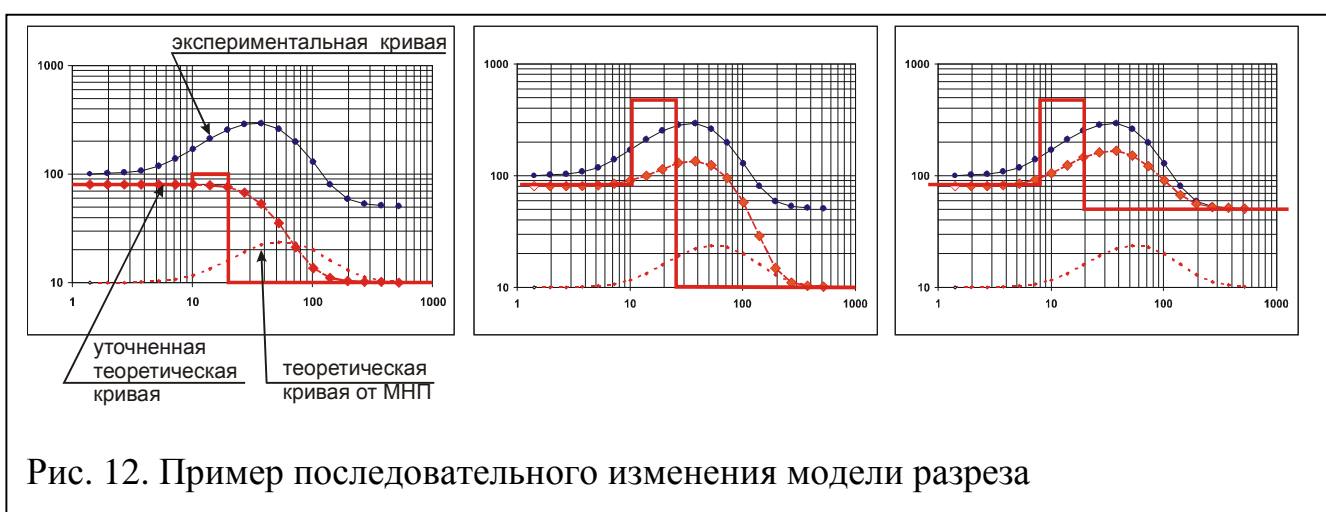


Рис. 12. Пример последовательного изменения модели разреза

Корректировку модели продолжают до получения приемлемой точности подбора (совпадения кривых). Считается, что допустимое расхождение кривых не должно быть больше погрешности полевых измерений (5 %).

После окончания подбора можно сказать, что созданная модель «адекватна» изучаемому разрезу – т.е. дает такую же кривую зондирования, что и полученная в поле и, возможно, описывает реальную ситуацию.

### Эквивалентность моделей

Когда мы говорили о сложностях решения обратной задачи, например, о неоднозначности получаемых решений, в частности имелось в виду следующее - одной и той же кривой зондирования зачастую соответствует не одна единственная модель, а целый ряд возможных моделей. Это явление носит название *эквивалентности геоэлектрических разрезов*.



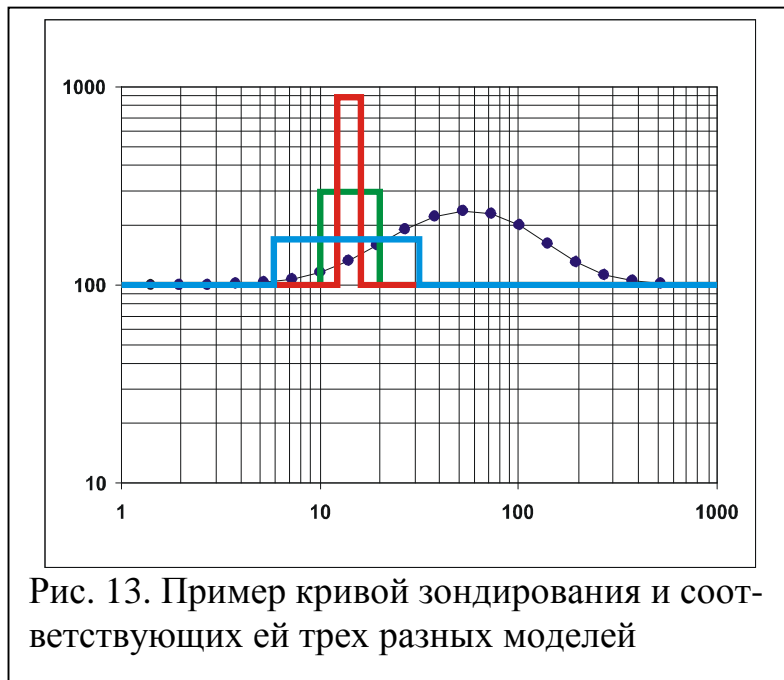
Эквивалентность характерна для моделей с количеством слоев большим 2-х. Эффект проявляется для промежуточных слоев повышенного или пониженного сопротивления.

Практически это значит, что интерпретатор не может однозначно выбрать правильную модель из набора возможных.

Также можно сказать, что для таких слоев *по кривой ВЭЗ невозможно корректно определить одновременно УЭС слоя и его мощность* (рис. 13).

Для получения правильного результата следует откуда-нибудь «взять» значения УЭС либо мощности слоя.

С этой целью принято параллельно с выполнением ВЭЗ проводить работы по определению УЭС типичных горных пород района работ. Также применяют совместную обработку данных ВЭЗ с данными бурения, результатами измерений в скважинах (*электрокаротаж*) или данными других геофизических методов.



Рассмотрим пример **применения ВЭЗ в комплексе с бурением.**

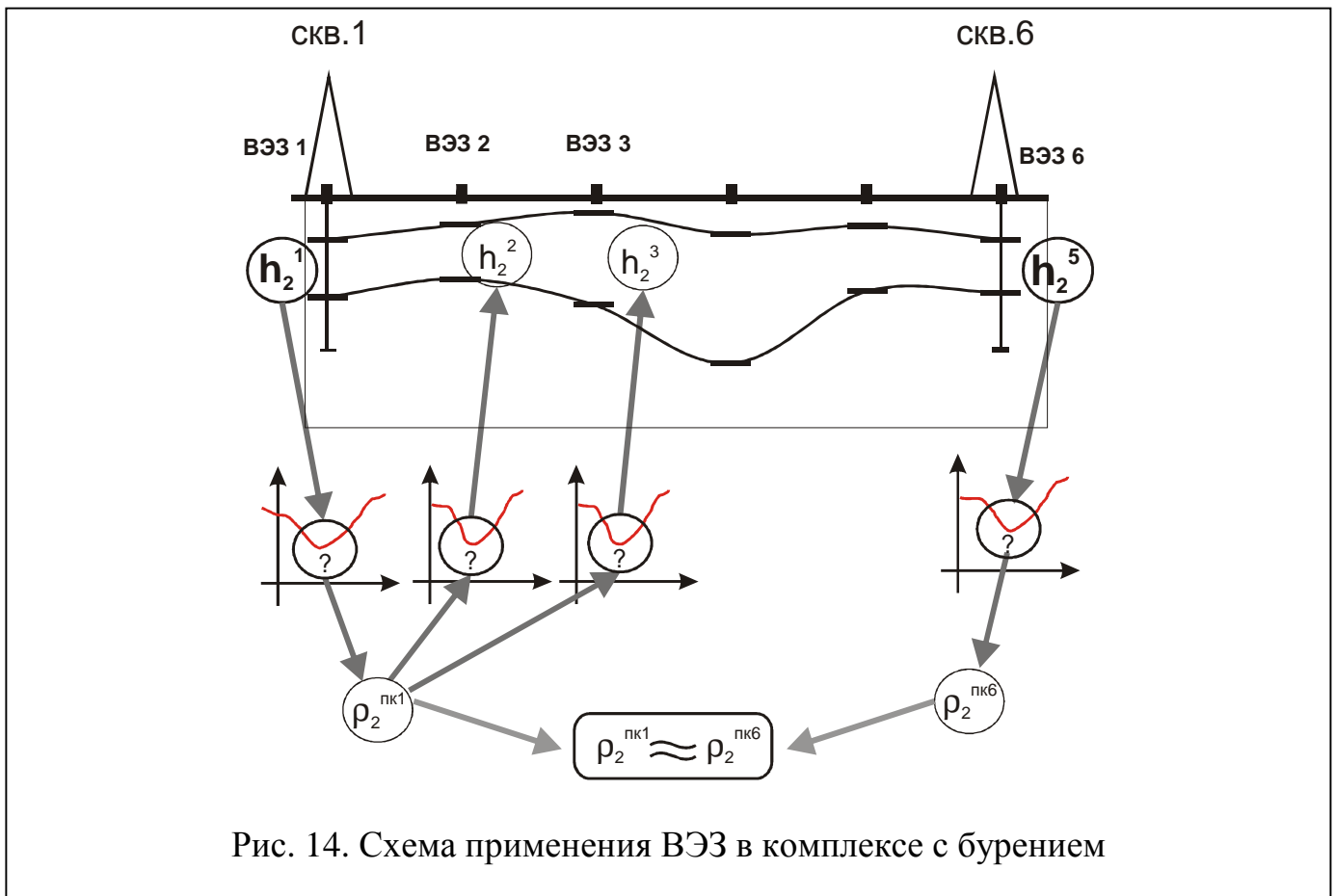
### Применение ВЭЗ в комплексе с бурением

Разберем гипотетическую производственную ситуацию: на профиле наблюдения выполнены несколько точек зондирований (рис. 14). На всех них в результате измерений получена трехслойная кривая ВЭЗ, причем *для 2-го слоя имеет место описанный выше эффект эквивалентности.*

Для корректного решения задачи подбора кривых зондирования (решения обратной задачи), необходимо знать либо значения УЭС второго слоя, либо значения мощностей слоя.

Для решения проблемы на месте выполнения ВЭЗ №1 бурится скважина №1. Тогда,

- имея значения мощности слоя 2 по данным бурения на пикете 1, мы решаем задачу подбора кривой ВЭЗ и **определяем УЭС второго слоя** ;
- далее, нам необходимо обработать данные ВЭЗ на пикетах, где скважин нет (было бы странно ожидать, что на всех точках ВЭЗ будет по скважине – тогда зачем ВЭЗ?). Выдвигается предположение-гипотеза, что **электрические свойства второго слоя ( $\rho_2$ ) не значительно изменяются вдоль профиля** (это верно в подавляющем большинстве случаев);
- тогда, для решения неоднозначности со 2-ым слоем на пикетах 2, 3 и т.д., примем значение УЭС этого слоя равным значению, полученному только что на пикете 1. Для этих пикетов, зная  $\rho_2$  определяем  $h_2$  и **получаем положения границ в разрезе**.



Считается правильным проверять по мере возможности свои предположения и гипотезы, поэтому в конце профиля (например, на пикете б) полезно пробурить еще одну скважину. На ней повторяется процедура, описанная для ВЭЗ 1 и скважины 1. Определяется значение  $\rho_2$  на пикете б и сравнивается со значением УЭС второго слоя на пикете 1. Если сравниваемые значения отличаются несущественно, то все в по-

рядке – наша гипотеза о слабой изменчивости свойств пород 2-го слоя вдоль профиля подтвердилась. Если нет – надо разбираться и применять другие методические приемы (в рамках данного пособия не рассматриваемые).

Электрические зондирования, выполненные в местах заложения скважин, называются *параметрическими ВЭЗ*.

Вышеописанный способ комплексирования геофизики и бурения является стандартным и дает на практике надежные результаты.

Использование данных бурения позволяет уточнить и «привязать» геофизические данные к реальному разрезу. Применение геофизики позволяет значительно сократить объемы бурения.

## Интерпретация кривых ВЭЗ в программе IPI2WIN

Программа IPI2WIN разработана на кафедре геофизики МГУ и предназначена для обработки и интерпретации профильных данных ВЭЗ (в рамках одномерных, т.е. горизонтально-слоистых моделей).

Главное окно программы IPI разделяется на три основных области (рис. 15):

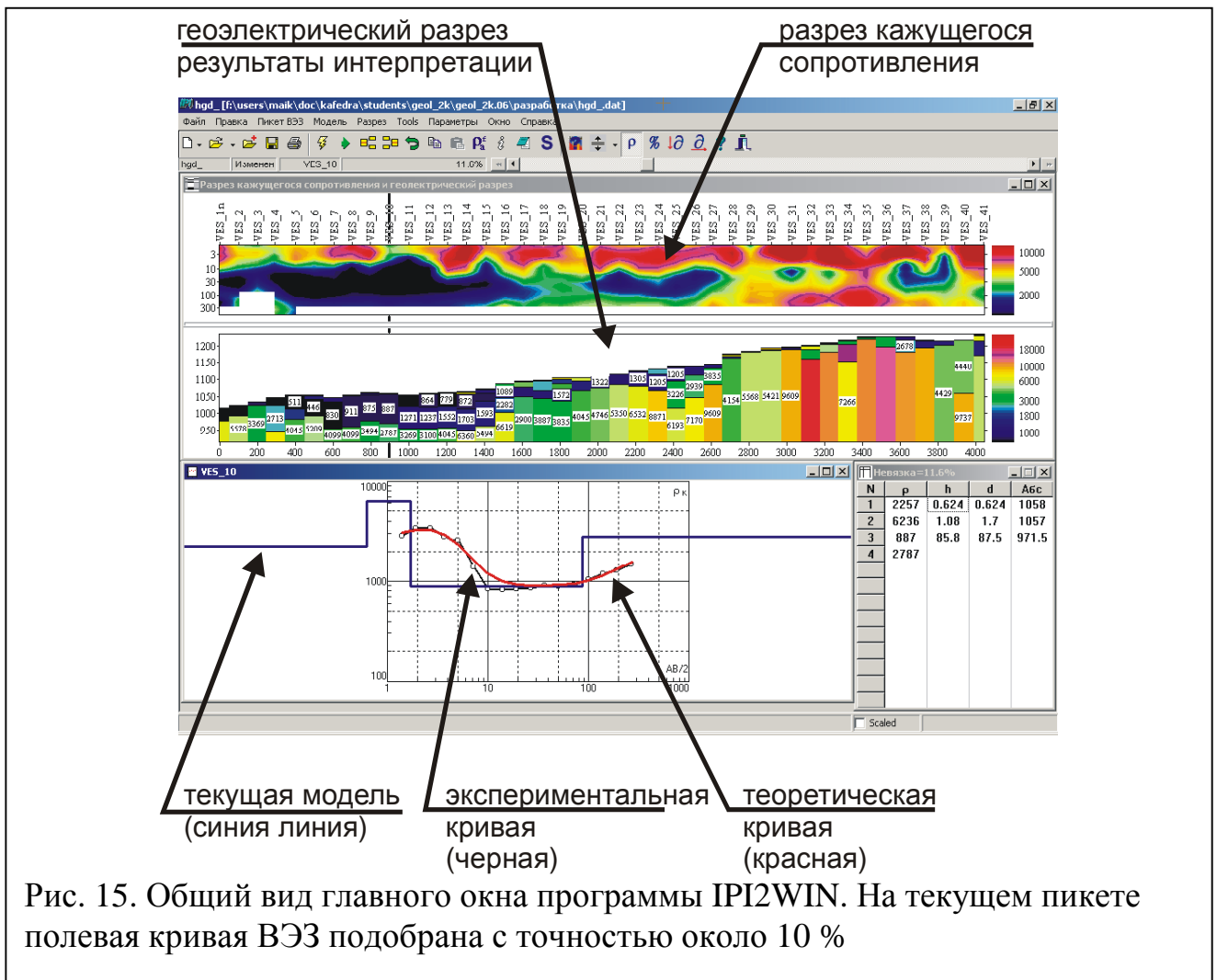


Рис. 15. Общий вид главного окна программы IPI2WIN. На текущем пикете полевая кривая ВЭЗ подобрана с точностью около 10 %

- в верхней части окна изображены два разреза – **разрез кажущегося сопротивления** и **геоэлектрический разрез** по результатам интерпретации;
- в левой нижней части окна **для выделенного пикета** на билогарифмическом бланке отображаются:
  - **экспериментальная** (полевая) кривая ВЭЗ – черным цветом;
  - **текущая модель** – синим цветом;

- **теоретическая кривая**, рассчитанная от модели – красным цветом;
- в **правой нижней** части окна отображаются **параметры модели** на текущем пикете в виде таблицы:

№	$\rho$ , Ом·м	h, м	d, м	Abs, м

где  $\rho$  - УЭС слоя, h – мощность слоя, d – глубина подошвы слоя, Abs – абсолютные отметки подошвы слоя (актуально при заданном рельефе).

### Разрез кажущегося сопротивления

Разрез кажущегося сопротивления является особой формой представления результатов профильных измерений методов ВЭЗ.

Если сделано одно-два зондирования, то проблем нет – строятся кривые ВЭЗ. А если отработан профиль длиной в несколько десятков или сотен точек?

Тогда делают так:

- берут бланк, подобный бланку для построения геологических разрезов, по горизонтальной оси откладываются пикеты профиля в метрах, а по вертикальной оси значения разноса АВ/2 (рис. 16);
- на таком бланке каждая кривая ВЭЗ представляется в виде вертикального ряда точек (каждая на соответствующем разносе) с приписанными к ним значениями  $\rho_k$ ;
- по полученному «полю» замеров проводятся изолинии равных значений  $\rho_k$ .

Верхняя часть полученного



Рис. 16. К построению разреза кажущегося сопротивления

разреза отвечает малым разносам и малым глубинам, а нижняя часть, соответственно, большим разносам и большим глубинам.

## **Интерпретация (подбор) кривых ВЭЗ**

На разрезе кажущегося сопротивления в программе IP1 можно выделить «мышкой» любой пикет. Полевая кривая с выделенного пикета отображается в левом нижнем окне черным цветом.

Модель разреза изображается в виде синей ломаной линии в том же окне. По умолчанию программа IP1 предлагает двухслойную модель начального приближения.

Программа IP1 автоматически решает прямую задачу от модели. Результат расчета (теоретическая кривая) изображается опять же в левом нижнем окне красным цветом.

Задача интерпретатора – меняя параметры модели (количество слоев, мощность и УЭС каждого слоя), совместить теоретическую (красную) и экспериментальную (черную) кривые зондирований.

### **Результат интерпретации**

Результат интерпретации профиля ВЭЗ (т.е. набор результирующих моделей) изображается в нижней части верхнего окна программы в виде геоэлектрического разреза.

## Список употребляемых имен, геофизических терминов и понятий

**удельное электрическое сопротивление (УЭС)** - величина, численно равная сопротивлению изготовленного из данного вещества прямолинейного провода с постоянной по длине площадью поперечного сечения, равной единице, и длиной, равной единице. Единица измерения – Ом·метр.

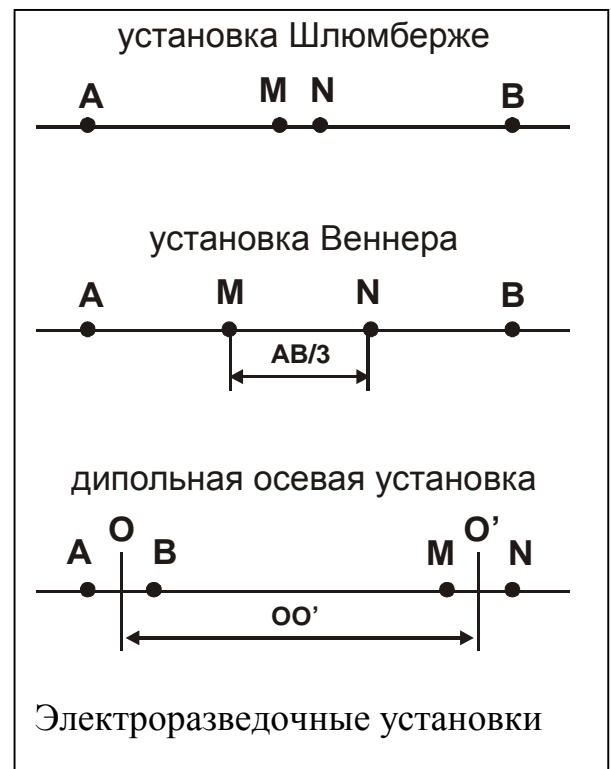
**электроразведочная установка** – схема взаимного расположения питающих и приемных электродов при производстве электроразведочных измерений. За многие годы придумано множество различных установок. Но основными из них являются старые, многократно проверенные установки *Шлюмберже*, *Веннера*, *дипольная осевая* установки и некоторые другие.

**установка Шлюмберже** – придумана французом К. Шлюмберже в 20-х г.г. прошлого века. Весьма популярна, называется также четырехэлектродной симметричной установкой. Именно эта установка применяется в настоящем практикуме. Особенность установки в том, что приемная линия MN много меньше размера установки АВ.

**установка Веннера** – придумана американцем Веннером в начале прошлого века. Установки похоже на установку Шлюмберже, но длина приемной линии MN здесь всегда равна  $1/3$  АВ. Обладает меньшей глубиной, чем Шлюмберже.

**дипольная осевая установка** – хороша тем, что требует минимум проводов, мобильна, часто применяется для профилирования. Обладает наименьшей глубиной из всех рассмотренных установок. Особенно чувствительна к субвертикально ориентированным объектам изучения (дайки и пр.). Разносом для этой установки считается длина между центрами питающего и приемного диполя OO'.

**Конрад Шлюмберже** – известный французский исследователь, один из основоположников электроразведки, активно работал в 1910-х – 1930-х г.г. Автор группы электроразведочных методов – метода со-



противлений, в том числе ВЭЗ, ЭП, а также электрокаротажа. Вместе с братом разработал первые серийные образцы электроразведочной аппаратуры на постоянном токе. Создатель одноименной геофизической фирмы. В настоящее время фирма «Шлюмберже» – один из мировых лидеров по производству сейсмических и каротажных исследований при поиске и разведке месторождений нефти и газа.

**глубинность электроразведочной установки** – максимальная глубина, выше которой горные породы оказывают влияние на результаты электроразведочных измерений.

Хотя в настоящей разработке утверждается, что глубинность электроразведочной установки примерно равна  $AB/2$ , это несколько упрощенное представление. Корректно говоря, глубинность исследования зависит от типа электроразведочной установки, строения разреза и других факторов и варьирует от  $1/10$  до  $1/2$  размера установки.

**разнос электроразведочной установки** – геометрический фактор, используемый при построении кривых зондирования, откладывается по оси абсцисс. Для различных установок разнос определяется по разному. Для установки Шлюмберже разнос принимается равным  $AB/2$ , для Веннера –  $AB/3$ , для дипольной установки –  $OO'$  (расстояние между центрами диполей).

**метод сопротивлений** – группа электроразведочных методов, использующих аппаратуру на постоянном токе или токе инфразвуковых частот (до 20 Гц), для которых определяющим свойством изучаемой среды является *удельное электрическое сопротивление*. Вообще в понятие электрических свойств горных пород входят УЭС, диэлектрическая проницаемость, поляризуемость, и другое.

К методу сопротивлений относятся электрические зондирования (ЭЗ), электропрофилирование (ЭП), метод заряда и др.

**электрическое зондирование (ЭЗ)** – метод электроразведки, традиционно применяемый для изучения горизонтально слоистых сред с углом наклона границ до 15-20 градусов. В современных модификациях (например, в варианте электротомографии), ЭЗ может применяться для изучения и более сложных разрезов, в том числе с объемными объектами изучения (трехмерные задачи). Для выполнения ЭЗ применяются любые электроразведочные установки.

Значения разносов выбирают в зависимости от требуемой глубинности исследований. Для инженерных и геологических задач, *минимальные разносы* обычно принимают равными 1-1.5 метра. *Максимальные разносы* редко делают больше первых километров. Таким образом,



электрические зондирования принято использовать для изучения сред до глубин в сотни метров (хотя, есть примеры выполнения зондирований с АВ до 20 км). Для решения более глубоких задач применяют другие методы электроразведки – ЗСБ, МТЗ и пр.

**вертикальное электрическое зондирование (ВЭЗ)** – электрическое зондирование, выполненное с симметричной четырехэлектродной установкой Шлюмберже.

**электрическое профилирование (ЭП)** – метод электроразведки, применяемый для поиска и изучения локальных объектов или неоднородностей разреза, например – крутопадающие интрузивные тела, разрывные или структурные нарушения и пр. Для выполнения ЭП применяют любые электроразведочные установки. В отличие от ЭЗ, измерения методом ЭП выполняют на одном-двух разносах, при сравнительно частом шаге по профилю. Зачастую выполняют площадную съемку методом электропрофилирования. Результаты ЭП представляют в виде графиков кажущегося сопротивления вдоль профилей наблюдений, карт графиков КС и карт изолиний КС.

**электрическая томография** (электротомография, ЭТ) – модификация метода сопротивлений, сочетающая в себе элементы зондирования и профилирования. Использует многоэлектродный способ измерений. ЭТ позволяет изучать сложно построенные среды – двумерные и трехмерные.

**аппроксимация** – способ математического описания сложных природных объектов. Включает в себя упрощение представлений о среде, в той мере, в какой это упрощение допустимо для корректного решения поставленной задачи. Математическое моделирование возможно только для моделей, описанных конечным набором параметров. Получение этой модели и есть аппроксимация.

Для примера зададимся вечным вопросом о форме Земли. Этот пример является задачей на аппроксимацию и может решаться с разной точностью:

*Первое приближение* - Земля имеет форму шара. Такая грубая аппроксимация подходит для решения задач влияния гравитационного поля Земли на движение небесных тел.

*Второе приближение* - Земля имеет форму сплюснутого сфероида. Эта аппроксимация тоже груба, но уже позволяет решать некоторые задачи навигации космических аппаратов на высоких орбитах, но не точнее.

Третье приближение - Земля имеет форму геоида (см. учебник по геодезии). Эта аппроксимация гораздо точнее предыдущих и позволяет решать точные задачи навигации космических аппаратов, но не подходит для аэро и наземной навигации.

Для решения более точных задач (в частности навигационных), существует еще более точные аппроксимации формы Земли – топографические карты разных масштабов.

Следует отметить, что существует опасность применить слишком точную аппроксимацию там, где этого не требуется. Можно, конечно, решать астрономические задачи с учетом формы Земли, полученной на основе топокарт (например, масштаба 1:50 000), но это не целесообразно, трудно выполнимо, хотя и возможно теоретически.

Правильная аппроксимация предполагает игнорирование несущественных деталей и сохранение важных особенностей объекта аппроксимации (какие детали важные, а какие несущественные зависит от решаемой задачи).

**геоэлектрическая модель** – результат математического описания электрических свойств геологического разреза. Модели бывают:

*одномерные* - разрез меняется только вдоль одного направления, например слоистый разрез

*двухмерные и трехмерные* - разрез меняется вдоль двух или трех направлений, соответственно.

Ясно, что реальные разрезы имеют трехмерное строение. Но, как правило, для решения многих практических задач достаточно и аппроксимации разрезов одномерными моделями.

Для практического использования, модель должна полностью описываться конечным числом параметров. Например, для описания слоистого разреза из  $N$  слоев требуется  $(2N-1)$  параметров:  $N$  значений УЭС слоев,  $(N-1)$  значений мощностей слоев (мощность последнего слоя принимается бесконечно большой).

Следует упомянуть, что в настоящем практикуме вся обработка данных ВЭЗ – подбор моделей, расчет прямых задач и др. осуществляется в рамках *только одномерных моделей*.

**прямая задача ВЭЗ** – задача вычисления кривой ВЭЗ, соответствующей заданной модели.

**обратная задача ВЭЗ** – задача получения модели соответствующей имеющейся кривой ВЭЗ. Математически сложная задача, характеризуется неустойчивостью решения. Для решения подобных некорректных (в математическом смысле) задач академиком А.Н. Тихоновым

создан специальный раздел вычислительной математики «теория некорректных задач».

**экспериментальная кривая ВЭЗ** (полевая кривая) – кривая зондирования, полученная в ходе полевых работ (т.е. в ходе полевого эксперимента).

**теоретическая кривая ВЭЗ** – кривая зондирования, полученная в результате решения прямой задачи от какой-либо модели.

**эквивалентность геоэлектрических моделей** – эффект когда целому ряду моделей, а вообще говоря, некоему множеству моделей соответствуют чрезвычайно близкие кривые зондирования (практически неразличимые с учетом погрешности полевых измерений). Для обоснованного выбора нужной модели из представленного ряда требуется получить априорную (т.е. внешнюю) информацию.

**априорная информация** – информация полученная «априори», т.е. *извне*. В нашем случае мы имеем дело с ВЭЗ и для нас априорная информация – это данные, полученные с помощью бурения, аэрофото съемки, визуального осмотра и всего чего угодно, но источник этих сведений никак не связан с полученными электроразведочными данными.

Обычными источниками априорной информации являются бурение, геологические соображения, данные других геофизических методов. В последнем случае говорят о *комплексировании геофизических методов*.

*Комплексированием геофизических методов* называют изучение разреза несколькими методами, имеющими разные физические основы, например ВЭЗ и сейсморазведка или ВЭЗ, сейсморазведка и магниторазведка и т.д. Желательно, чтобы изучаемое тело хорошо проявлялось в разных геофизических полях.

Выбор методов, включенных в применяемый комплекс, зависит от свойств объекта изучения, решаемой задачи, экономических факторов и пр.

При комплексировании каждый метод дает «свое видение» разреза: сейсморазведка «видит» *скоростные и плотностные* характеристики пород, ВЭЗ – *электрические свойства* и т.д. И хотя для каждого метода существует эквивалентность, но **совместная обработка** полученных данных позволяет **взаимно увязать** результаты и значительно повысить их достоверность и точность.

Также применяется комплексирование геофизики с другими методами изучения геологических сред – с бурением, геохимическими методами и прочим.

Рассмотренный в настоящем пособии пример применения ВЭЗ совместно с бурением, является частным случаем комплексирования.

**кажущееся электрическое сопротивление** – параметр электрического поля, определяемый по формуле:

$$\rho_K = K \cdot \frac{\Delta U_{MN}}{I_{AB}}, \text{ Ом}\cdot\text{м.}$$

где,  $K$  – геометрический коэффициент (зависит от взаимного расположения и расстояний между электродами  $A$ ,  $B$ ,  $M$  и  $N$ ),  $\Delta U_{MN}$  – разность потенциалов на приемных электродах  $M$  и  $N$ ,  $I_{AB}$  – сила тока, протекающего в питающей линии.

Кажущееся сопротивление ( $KC$ ) зависит от типа установки, строения изучаемого разреза и других факторов. В целом  $KC$  характеризует *интегральное (или эффективное) удельное электрическое сопротивление* горных пород в зоне действия электроразведочной установки (области исследования).

**метод подбора** – способ решения обратной задачи, когда выбор модели, создающей кривую, сходную с полевой, осуществляют путем перебора множества возможных вариантов. При этом критерием выбора нужной модели являются:

- минимальные отличия теоретической и экспериментальной кривой
- соответствие модели здравому смыслу и геологическим представлениям об изучаемом разрезе.

Метод подбора широко применяется не только в электроразведке, но и в других геофизических (и не только геофизических) методах.

**параметрические ВЭЗ** – электрические зондирования, выполненные на местах заложения скважин. В этом случае для полученной кривой ВЭЗ известен геологический разрез. В результате появляется возможность выяснить значения  $UЭС$  горных пород вскрытых скважиной, оценить их контрастность и др.

**заверочная скважина** – скважина, проектируемая на основе геофизической информации. Применяется для проверки и уточнения результатов геофизических работ. Обычно размещается в местах выявленных аномалий или каких либо особенностей разреза.

**электрокаротаж** (электрический каротаж)– группа электроразведочных методов для изучения электрических свойств пород, вскрытых скважинами. В некоторых вариантах электрокаротажа в скважину опускается миниатюрная электроразведочная установка (профилирования или зондирования) и производятся измерения по всей глубине – от устья до забоя. Каротаж позволяет достаточно точно определить физ. свойства горных пород в естественном залегании.

## Рекомендованная литература

1. Хмелевской В.К. **Электроразведка**, изд. 2-е. – М.: изд-во Московского университета, 1984. 422 с.
2. **Электроразведка: пособие по электроразведочной практике для студентов геофизических специальностей.** / Под ред. В.К. Хмелевского, И.Н. Модина, А.Г. Яковлева – М.: изд-во Московского университета 2005. 311 с.  
а также, издание 2-ое, 2013 г. В 2-х томах.
3. Телфорд В.М., Гелдарт Л.П., Шерифф Р.Е., Кейс Д.А.  
**Прикладная геофизика.** (перевод с английского) М., Недра, 1980.