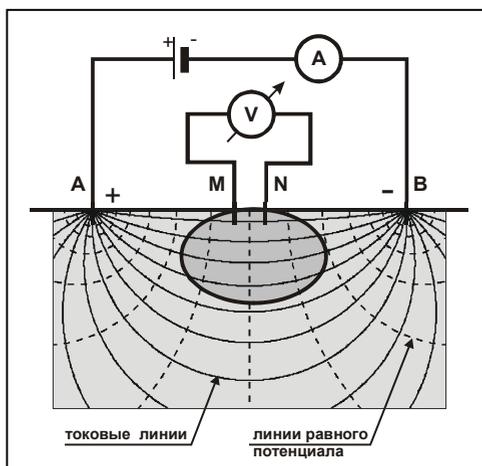


ВЕРТИКАЛЬНОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ



практикум курса “Основы геофизических методов”
для студентов
геологических специальностей

методическое пособие

Москва, 2007

Практикум по методу вертикального электрического зондирования (ВЭЗ) проводится в рамках раздела "основы электроразведки", учебного курса "основы геофизических методов" для геологов младших курсов Геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова.

Настоящий практикум проводится с целью дать студентам представления об одном из основных методов электроразведки, продемонстрировать физические основы метода, принципы обработки данных, обозначить условия и границы применения метода, возникающие трудности и способы их преодоления.

Все вышеперечисленное доносится до слушателей курса с тем, чтобы будущие молодые специалисты, более адекватно относились к геофизическим методам, имели представление о "внутренней кухне" этой отрасли и были более подготовлены к грамотной постановке задач и продуктивному сотрудничеству с геофизиками.

Теоретическая часть

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 и развитию во всем мире.

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

Настоящий практикум проводится с целью продемонстрировать физические основы метода ВЭЗ, условия его применения. При этом подразумевается, что освоение материала по ВЭЗ поможет слушателям понять особенности и других геофизических методов.

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 неким подобием понятия электрического сопротивления в радиотехнике, но в отличие от последнего, измеряется не в Омах, а 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, являются проводниками электрического тока.

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

1. *удельное электрическое сопротивление породообразующих минералов*
2. *пористость (трещиноватость)*
3. *влагонасыщенность*
4. *удельное электрическое сопротивление поровой влаги* (напрямую связано с соленостью подземных вод и температурой)
5. *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 слабо диэлектриками и не проводят электрический ток. Исключением являются 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 воды в породе (т.е. чем больше пористость и влагонасыщенность) и чем ниже УЭС воды – 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 может опуститься – является УЭС воды, насыщающей породу.

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 – проводник, 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 капиллярными процессами в глинах. Чем больше глинистость горных пород, тем ниже УЭС.

Таблица удельных электрических сопротивлений некоторых горных пород

| Наименование горной породы | УЭС мин. Ом·м | УЭС типичное Ом·м | УЭС макс. Ом·м |
|---|---------------|-------------------|----------------|
| Глины | 5 | 10 | 15 |
| Суглинки | 15 | 30 | 50 |
| Супеси | 30 | 50 | 80 |
| Пески водонасыщенные | 50 | 80 | 200 |
| Пески слабо увлажненные | 100 | 150 | 500 |
| Пески сухие | 200 | 500 | 10000 |
| Карбонатные скальные породы слабо трещиноватые | 500 | 1000 | 5000 |
| Интрузивные горные породы слабо трещиноватые | 1000 | 2000 | 10000 |
| Дресва | 30 | 50 | 500 |
| Вечномерзлые породы различной льдистости | 500 | | 80000 |
| Руды минералов проводников (в основном сульфидов) | 0,001 | | 1-5 |

Как видно из приведенных примеров, удельное электрическое сопротивление различных горных пород весьма сильно различаются – от первых Ом·м до десятков тысяч Ом·м. Что дает возможность геофизикам-электроразведчикам уверенно распознавать различные горные породы и решать задачи:

- поиска и разведки грунтовых вод,
- картирования мерзлых грунтов,
- поиск зон развития карста в карбонатных породах,
- разделять осадочные терригенные породы по глинистости.
- и многое другое.

Физические основы метода ВЭЗ

Идея метода ВЭЗ чрезвычайно проста. На поверхности земли собирают *электроразведочную установку*, которая, как правило, состоит из двух питающих и двух приемных электродов (см. Рис. 1). В

качестве электродов обычно применяют металлические штыри, которые забиваются в землю. **Питающие электроды** принято обозначать буквами **А и В**, **приемные – М и N**.

К питающим электродам подключают **источник тока** – например, батарею. В земле возникает электрическое поле и, соответственно, электрический ток. Силу тока в питающей линии (I_{AB}) измеряют с помощью **амперметра**, включенного в цепь АВ.

На приемных электродах М и N возникает разность электрических потенциалов (ΔU_{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 электрическое сопротивление (КС)**, обозначаемое ρ_k , и измеряемое в Ом·м:

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

где, К – геометрический коэффициент (зависит от расстояний между электродами А, В, М и N), ΔU_{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 глубин, примерно равным половине длины установки - АВ/2 (см. Рис. 1).

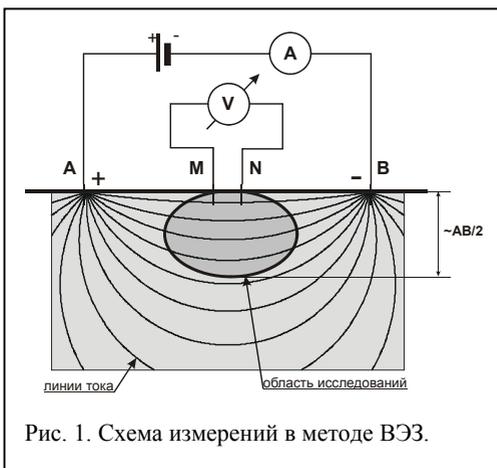


Рис. 1. Схема измерений в методе ВЭЗ.

Если изучаемая *среда однородна* - с УЭС равным $\rho_{\text{среды}}$, то значение полученного кажущегося сопротивления ρ_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 ρ_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 АВ/2 – тем глубже «погружается ток в землю» и тем больше глубинность исследований (см. Рис. 2).

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

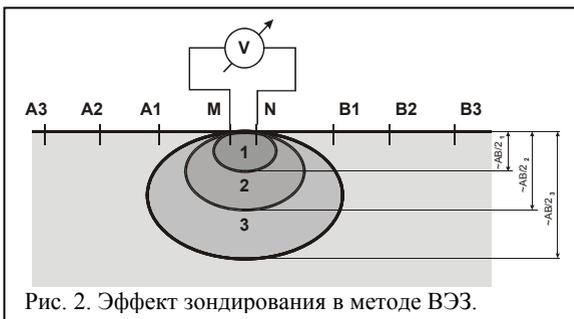


Рис. 2. Эффект зондирования в методе ВЭЗ.

Значения АВ/2 выбирают в зависимости от требуемой глубинности исследований. Как правило, *минимальные АВ/2* принимают 1-1.5 метра. *Максимальные АВ/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

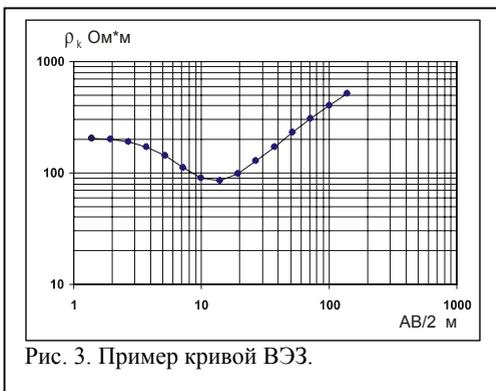


Рис. 3. Пример кривой ВЭЗ.

гося сопротивления, измеренных при известных $AB/2$. В электроразведке параметр $AB/2$ называют *разносом питающей линии* (или просто *разносом*).

Для удобного представления результатов наблюдений строят *график зависимости ρ_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 (см. Рис. 3) По обеим осям такого бланка откладываются не значения ρ_k (Ом·м) и $AB/2$ (м), а их логарифмы (см. Рис. 3).

Кривая ВЭЗ качественно отображает изменения УЭС горных пород с глубиной – левая часть графика отвечает приповерхностным слоям, чем дальше вправо, тем больше глубинность. В данном случае, на рисунке изображена 3-х слойная кривая ВЭЗ.

Пример 2-х слойной кривой ВЭЗ.

Рассмотрим случай - выполняются наблюдения методом ВЭЗ в районе г. Днепропетровска (Украина). Как известно, г. Днепропетровск располагается на территории украинского щита, сложенного гранитоидами. Верхняя часть разреза представлена современными отложениями, в частности лессами (см. Рис. 4).

Описанный разрез можно

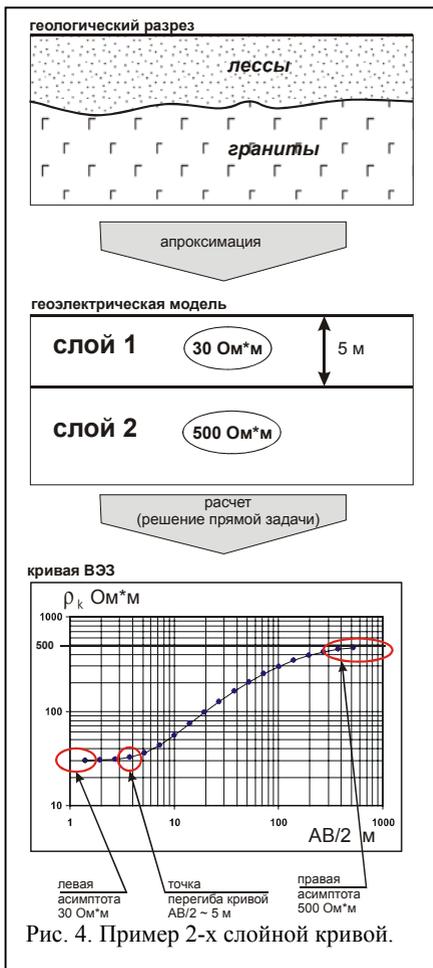


Рис. 4. Пример 2-х слойной кривой.

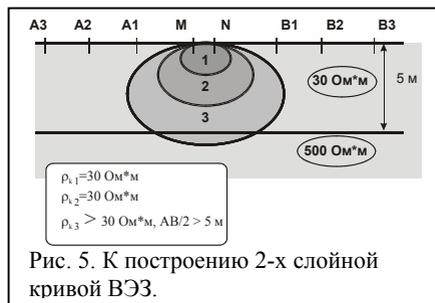
аппроксимировать (т.е. описать в несколько упрощенном виде) двухслойной *геоэлектрической моделью*:

- **граниты**, как любые скальные горные породы, 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 5 м.

Какая будет кривая ВЭЗ?

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 ρ_k будет точно соответствовать УЭС этого слоя (см. Рис. 5). Т.е. $\rho_k=30$ Ом·м.

И так будет до тех пор, пока разнос не увеличится настолько, что в область исследования попадет граница и верхняя часть второго слоя. Это произойдет на разносах равных приблизительно 5 м. Поскольку второй слой обладает сравнительно высоким сопротивлением, то ρ_k начнет возрастать (точка перегиба на кривой ВЭЗ, см. Рис. 4.).



При дальнейшем увеличении разноса ρ_k будет расти и в итоге асимптотически приблизится к УЭС второго слоя. Но значение ρ_k даже при очень большом разносе не станет равным 500 Ом·м. Это обусловлено тем, что всегда в области исследования будет присутствовать первый слой, вносящий свой вклад в интегральный параметр ρ_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. 6):

- в основании разреза (т.е. до глубин сотни м.) залегают каменноугольные известняки,

- выше по разрезу располагаются черные юрские глины.
- верхняя часть разреза сложена четвертичными, в том числе ледниковыми отложениями.

Аппроксимируем описанный разрез трехслойной *геоэлектрической моделью*:

- **известняки**, как любые скальные горные породы, 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 Подмосковья 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 ρ_k 50 Ом·м.

При увеличении разноса $AB/2$ до величин примерно 10 м ρ_k начнет уменьшаться (кривая «пойдет» вниз). Но, поскольку мощность глин невелика, то при увеличении разноса значения ρ_k не приблизится к значению УЭС

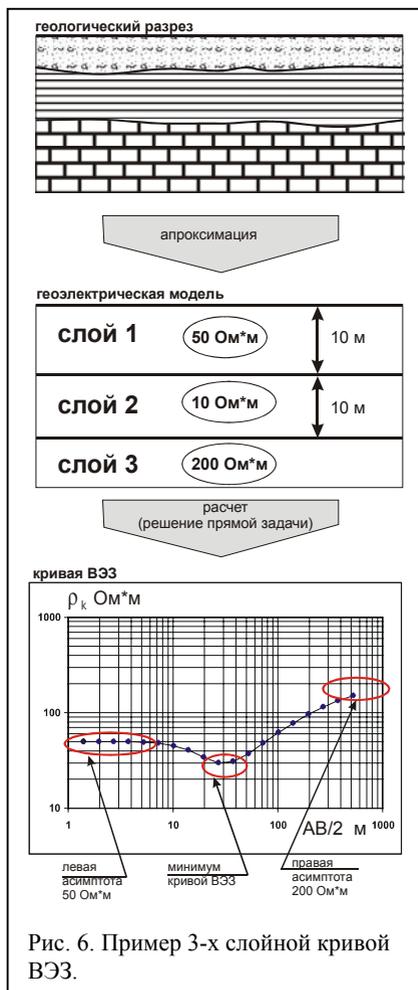


Рис. 6. Пример 3-х слойной кривой ВЭЗ.

глин, а быстро начнут увеличиваться под влиянием известняков (на кривой ВЭЗ образуется минимум, связанный с влиянием слоя глин).

Влияние третьего слоя начнется на разносах около 20 м. При дальнейшем увеличении разноса ρ_k будет расти, и в итоге будет асимптотически приближаться к УЭС основания разреза. 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 соображений 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 аппаратура на ультранизких частотах (1-10 Гц) или на постоянном токе. Среди применяемых отечественных приборов можно назвать следующие образцы:

- АЭ-72 – прибор разработки 60-х г.г., работающий на постоянном токе;
- АНЧ-3 – прибор разработки 70-80-х г.г., работающий на переменном токе на частоте 4.88 Гц;
- ЭРА – прибор разработки конца 80-х г.г., 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 стале-медные 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: погрешности в задании разностей АВ, отклонения положений электродов от прямой линии, индукционные наводки и пр.;
- наводки от линий электропередач, электрофицированных железных дорог и т.д.;
- влияние рельефа;
- влияние локальных неоднородностей изучаемого разреза, залегающих на глубинах от первых сантиметров.

Влияние помех приводит к различным искажениям на кривых ВЭЗ. Нормативные документы требуют от геофизиков, чтобы погрешность полевых наблюдений не превышала 5%.

Зондирование и профилирование

Из идеи метода ВЭЗ и приведенных примеров понятно, что данный метод применяется для изучения слоистых сред. Идея **зондирования** предполагает, что разрез изучается сверху вниз. Принято использовать ВЭЗ для изучения горизонтально-слоистых сред с небольшими углами наклона границ (до 15-20 градусов).

Если возникает необходимость изучения не протяженных слоев, а локальных объектов (интрузивные или рудные тела, разрывные нарушения и т.д.) следует применять несколько другой подход. Для поиска локальных объектов принято применять другой метод электроразведки – **электропрофилирование (ЭП)**.

Идея метода ЭП еще проще, чем идея метода ВЭЗ. Из-

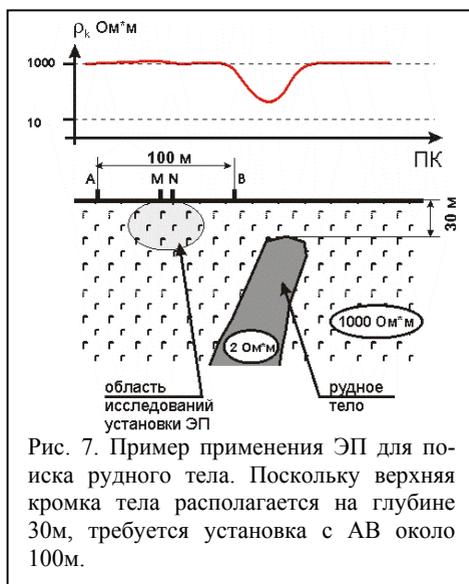


Рис. 7. Пример применения ЭП для поиска рудного тела. Поскольку верхняя кромка тела располагается на глубине 30м, требуется установка с АВ около 100м.

мерения производятся с такой же электроразведочной установкой как в методе ВЭЗ, но только при одном-двух значениях АВ/2. Установка профилирования перемещается по профилю наблюдений с шагом от 5-10 до 50-100, в зависимости от размеров искомых тел и требуемой детальности съемки.

Фактически ЭП – является «укороченным ВЭЗ-ом». Величина используемых при профилировании разносов АВ/2 определяется исходя из требуемой глубины исследований (глубины залегания искомых объектов).

Результаты электропрофилирования представляют в виде графика кажущегося сопротивления вдоль профиля наблюдений (см. Рис. 7).

Прямая и обратная задача

Вернемся к нашим примерам 2-х и 3-х слойных кривых, которые получены для рассмотренных моделей. Необходимо сказать, что *переход от разреза представленного (аппроксимированного) некоторой моделью к кривой зондирования называется **решением прямой задачи ВЭЗ***.

Решение прямой задачи выполняется с помощью специальных компьютерных программ и производится быстро и точно. С математической точки зрения, выполняемые расчеты не представляют собой сложности. Время расчет одной кривой на современном компьютере - значительно менее секунды.

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

Существует много способов решения обратных задач. В рамках практикума рассмотрен один из них – ***метод подбора***.

Интерпретация кривой ВЭЗ (решение обратной задачи) 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. мы 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. проводится анализ экспериментальной кривой, оценивается число слоев, соотношения сопротивлений слоев, примерные глубины границ.

В нашем примере (см. Рис. 8), кривая явно трехслойная, причем $\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$.

3. 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 разноса (кривая «идет вверх»), то и УЭС слоев должно возрастать с глубиной. Параметры модели можно представить по разному:

- в виде таблицы

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 (см. Рис. 8).

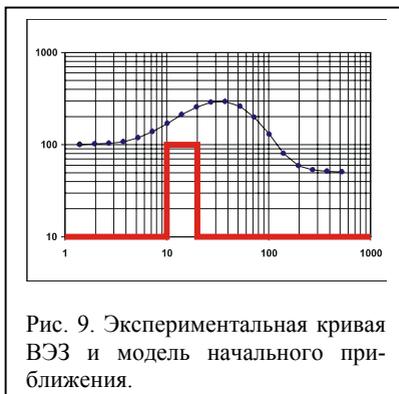
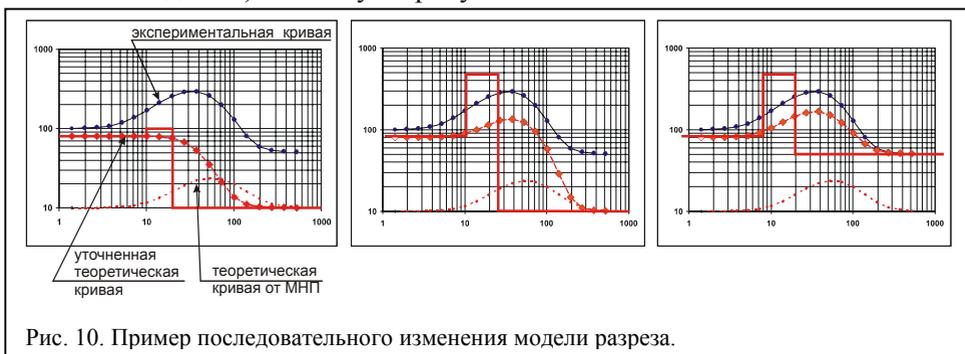
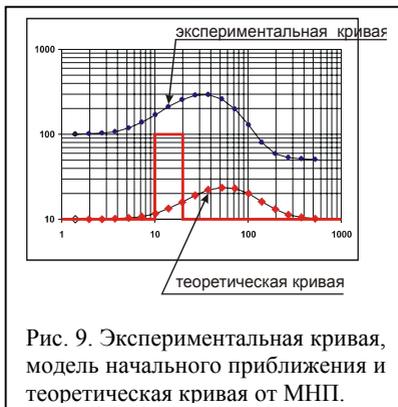


Рис. 9. Экспериментальная кривая ВЭЗ и модель начального приближения.

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.

4. Для модели начального приближения решается прямая задача - рассчитывается кривая ВЭЗ. Такую кривую принято называть **теоретической** (см. Рис. 9).
5. Производится сравнение двух кривых: **экспериментальной** и **теоретической**. Как правило, кривые сильно различаются (см. Рис. 9).
6. 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. (см. Рис. 10)
Задача обработчика – совместить теоретическую (определяемую моделью) и полевую кривую.



В приведенном примере частичного подбора (рис. 10), выполнено три подхода:

1. увеличено сопротивление 1-го слоя
2. увеличено сопротивление 2-го слоя

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.

Корректировку модели продолжают до получения приемлемой точности подбора. Считается, что допустимое расхождение кривых не должно быть больше погрешности полевых измерений. Максимально допустимая погрешность полевых измерений в электроразведке - 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, как правило, соответствует не одна единственная модель, а целый ряд возможных моделей. Этот эффект носит название **эквивалентность геоэлектрических разрезов**.

Эквивалентность характерна для моделей с количеством слоев больше 2-х. Как правило, эффект проявляется для промежуточного слоя повышенного или пониженного сопротивления.



Рис. 11. Пример кривой зондирования и соответствующих ей трех разных моделей.

Практически это значит, что интерпретатор не может выбрать правильную модель из набора возможных. Отсутствуют объективные критерии выбора.

Также можно сказать, что для таких слоев *по кривой ВЭЗ невозможно корректно определить одновременно УЭС слоя и его мощность* (см. Рис. 11).

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 данные бурения и выполняют измерения в скважинах (*электрокаротаж*).

Рассмотрим пример грамотного применения ВЭЗ в комплексе с бурением.

Применение ВЭЗ в комплексе с бурением

Разберем производственную ситуацию: на профиле наблюдения выполнены несколько точек зондирований (см. Рис. 12). 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 разреза, 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* (см. Рис 12).
- 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 (ρ_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 ρ_2 определяем h_2 и *получаем положения границ в разрезе* (см. Рис. 12).

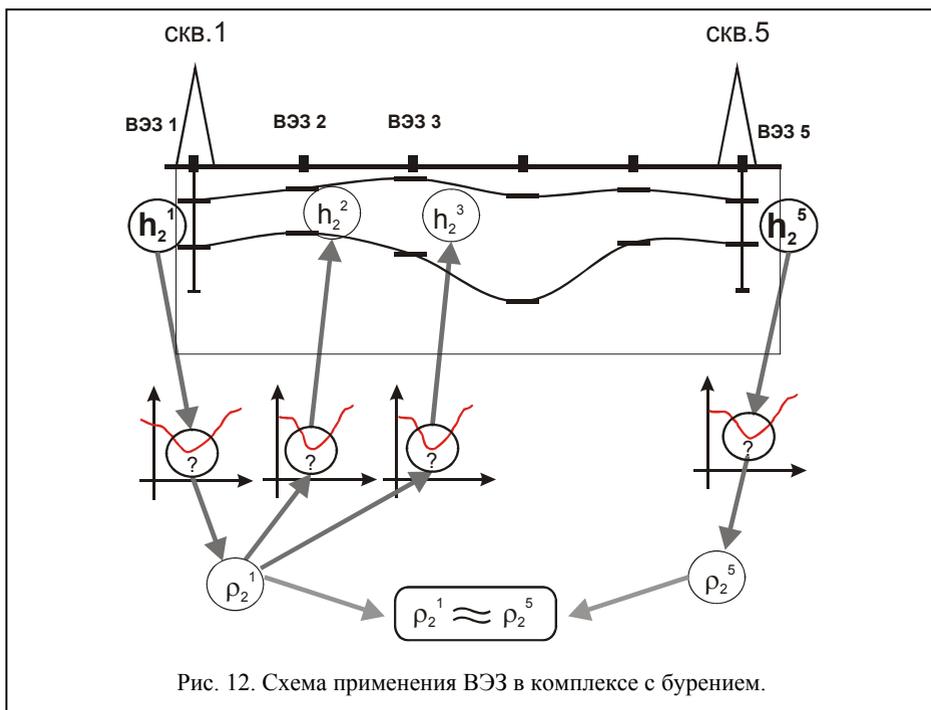


Рис. 12. Схема применения ВЭЗ в комплексе с бурением.

Считается хорошим тоном проверять по мере возможности свои предположения и гипотезы, посему в конце профиля (например, на пикете 5) полезно пробурить еще одну скважину. На ней повторяется процедура, описанная для ВЭЗ 1 и скважины 1. Определяется значение ρ_2 на пикете 5 и сравнивается со значением УЭС второго слоя на пикете 1. Если сравниваемые значения отличаются несущественно, то все в порядке – наша гипотеза о слабой изменчивости свойств пород 2-го слоя вдоль профиля подтвердилась. Если нет – надо разбираться.

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

Вышеописанный способ комплексирования геофизики и бурения дает надежные результаты:

- Использование данных бурения позволяет уточнить и «привязать» геофизические данные к реальному разрезу.
- Применение геофизики позволяет значительно сократить объемы бурения и, сэкономив средства, более детально изучить разрез.

Заключение

Данный труд не претендует на исчерпывающее описание метода ВЭЗ. Для выполнения грамотных и эффективных наблюдений требуется иметь подготовку геофизика-электроразведчика.

Описанные геофизические понятия: *модель, эквивалентность, применение данных бурения для увязки геофизических данных* и т.д., в полной мере можно отнести и к другим геофизическим методам – магниторазведке, гравиразведке, сейсморазведке и др.

Стоит упомянуть, что чем меньше геофизику известно об объекте поиска (исследования) и условиях его залегания (например, отсутствуют данные бурения и другая априорная информация), тем хуже будут результаты геофизических работ. И это справедливо, ибо если не знать что искать, то вряд ли можно это найти.

Также, справедливо обратное утверждение – чем лучше геолог и геофизик понимают друг друга, обмениваются информацией и рабочими соображениями, тем лучше будет результат их совместной работы.

Интерпретация кривых ВЭЗ в программе IPI2WIN

Главное окно программы IPI разделяется на три основных части (см. Рис. 13):

- в верхней части окна изображены два разреза – *разрез кажущегося сопротивления* и *геоэлектрический разрез* по результатам интерпретации.

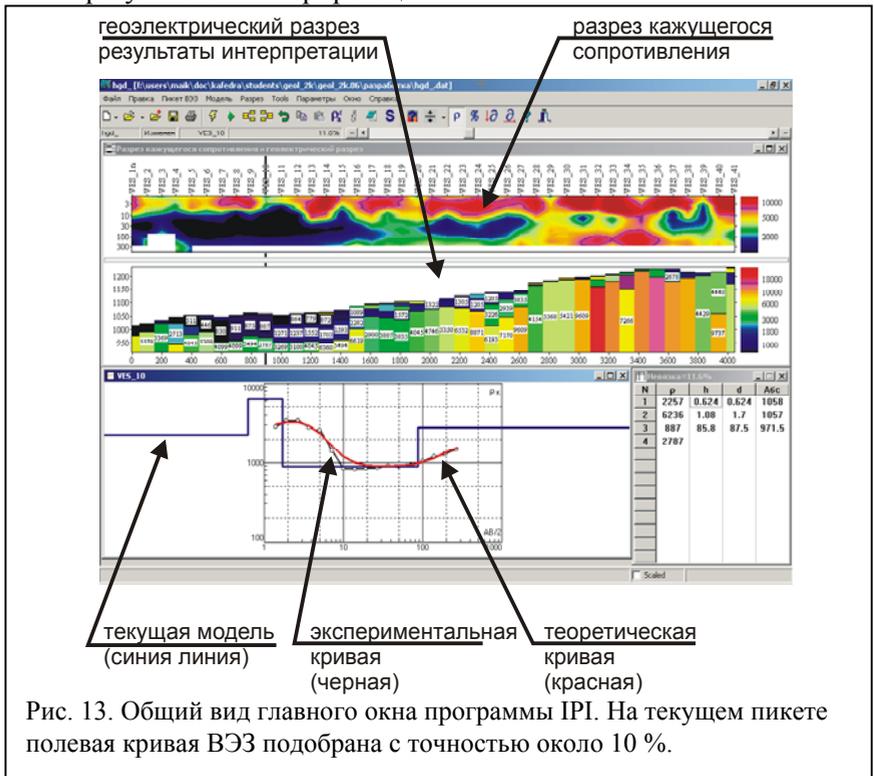


Рис. 13. Общий вид главного окна программы IPI. На текущем пикете полевая кривая ВЭЗ подобрана с точностью около 10 %.

- 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:

| № | ρ , Ом·м | h, м | d, м | Abs, м |
|---|---------------|------|------|--------|
| | | | | |
| | | | | |

где, ρ - 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 несколько специфической формой представления результатов 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 (см. Рис. 14):

- берут бланк, подобный бланку для построения геологических разрезов, по горизонтальной оси откладываются пикеты профиля в метрах, а по вертикальной оси значения разности АВ/2.
- на таком бланке каждая кривая ВЭЗ представляется в виде вертикального ряда точек (каждая на соответствующем разnose) с приписанными к ним значениями ρ_k (см Рис. 14).
- по полученному «полю» замеров проводят изолинии равных значений ρ_k (см Рис. 14)



Рис. 14. Построение разреза кажущегося сопротивления.

Верхняя часть полученного разреза отвечает малым разносам и малым глубинам, а нижняя часть, соответственно, большим разносам и большим глубинам (см. Рис. 13).

На разрезе кажущегося сопротивления в программе IPI 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 IPI предлагает двухслойную модель начального приближения.

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

Задача интерпретатора – меняя параметры модели, совместить теоретическую (красную) и экспериментальную (черную) кривые зондирований.

Результат интерпретации профиля ВЭЗ (т.е. набор результирующих моделей) изображается в нижней части верхнего окна программы в виде геоэлектрического разреза (см. Рис. 13).

Практическое задание

Практикантам предлагается несколько вариантов (на выбор студентов) геологических задач. Задачи подразделяются на несколько классов: структурные, поисковые и разведочные, инженерно-геологические, гидрогеологические, геоэкологические и мерзлотные задачи – всего 10 вариантов.

Для каждого варианта приводится описание геологической ситуации и сформулированы задачи, решаемые электроразведкой методом ВЭЗ.

Для каждого случая имеется профиль, на котором выполнено 10 точек ВЭЗ, а также пробурены 3 скважины (на пикетах 1, 6 и 10)

Необходимо провести интерпретацию кривых ВЭЗ по профилю с учетом данных бурения и оформить результаты. Для чего:

Первый этап

1. Построить геологический разрез по данным бурения на бланке.
2. Построить априорную геоэлектрическую модель по данным бурения и таблице физ. свойств. Для этого следует указать предполагаемые значения УЭС пород, на построенном геологическом разрезе.

Второй этап

3. для пикетов ВЭЗ, совмещенных со скважинами (*параметрические ВЭЗ*), ввести в программе IP1 априорные модели. В этой модели, очевидно, глубины будут взяты со скважин, а УЭС слоев из таблицы физ. свойств. Программа IP1 автоматически рассчитает для заданных моделей теоретическую кривую зондирования.
4. оценить разницу экспериментальной и теоретической кривых для параметрических ВЭЗ. Откорректировав модели, совместить обе кривые, при этом в моделях можно менять только значения УЭС слоев (положения границ трогать нельзя – они взяты со скважин).
5. оценить изменчивость полученных значений УЭС слоев (п. 4.) по профилю. Если сопротивления меняются слабо – то все выполнено правильно.

6. провести интерпретацию остальных кривых ВЭЗ (не совмещенных со скважинами), при этом следует применять полученные на параметрических ВЭЗ значения УЭС слоев и менять их нельзя.
7. Построить уточненный геолого-геофизический разрез по данным ВЭЗ и бурения. Уточненный разрез будет совпадать со старым в местах расположения скважин, но отличаться в межскважинных промежутках.
8. Составить легенду для построенного разреза.
9. Написать заключение.

План письменного заключения

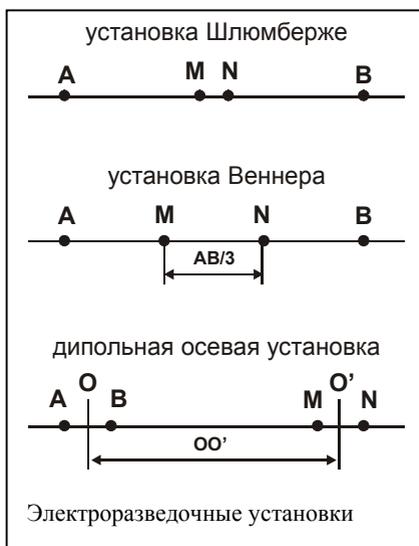
1. Дать краткое описание результатов интерпретации – количество выделяемых разностей горных пород и слоев в итоговом геологическом разрезе, значения УЭС горных пород.
2. Описать выявленные электроразведкой особенности строения разреза, особенно те из них, что были пропущены при бурении.
3. Указать (с обоснованием) *места расположения заверочных скважин и требуемую глубину бурения*, для проверки результатов геофизики (не более 3-х скважин). Проектные скважины вынести на итоговый разрез.

Объем заключения – не более 1-ой страницы.

Список употребляемых имен, геофизических терминов и понятий

1. **Конрад Шлюмберже** – известный французский исследователь, один из основоположников электроразведки, активно работал в 1910-х – 1930-х г.г. Автор группы электроразведочных методов – метода сопротивлений, 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» – признанный мировой лидер по производству сейсмических и каротажных исследований при поиске и разведке месторождений нефти и газа.
2. **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.
3. **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 установка* и некоторые другие.

установка Шлюмберже – придумана французом К. Шлюмберже в 20-х г.г. прошлого века. Весьма популярна, называется также четырех-электродной 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 похожи 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' .

4. **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.

5. **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).

6. **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.

7. **электрическое зондирование (ЭЗ)** – метод электроразведки, традиционно применяемый для изучения горизонтально слоистых сред с углом наклона границ до 15-20 градусов. В современном понимании, 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. Как правило, *минимальные разносы* 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.
8. **вертикальное электрическое зондирование (ВЭЗ)** – электрическое зондирование, выполненное с симметричной четырехэлектродной установкой Шлюмберже.
9. **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.
10. **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 точная аппроксимация 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 практически не 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).

11. 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 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*.

12. **прямая задача ВЭЗ** – задача вычисления кривой ВЭЗ, соответствующей заданной модели.
13. **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».
14. **экспериментальная кривая ВЭЗ** (полевая кривая) – кривая зондирования, полученная в ходе полевых работ (т.е. в ходе полевого эксперимента).
15. **теоретическая кривая ВЭЗ** – кривая зондирования, полученная в результате решения прямой задачи от какой-либо модели.
16. **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.

Рассмотрим, для примера, известную ситуацию с Волком и семерыми козлятами. Козлята оказались в трудной ситуации, когда по одному *параметру* – тону голоса существа, поющего им из-за двери известную песенку, они пытались решить задачу – «Кто же там за дверью?».

Как показал их печальный опыт, задача оказалась *некорректной, с эквивалентностью* – и Коза и Волк пели одинаково (или неразличимо похоже).

Геофизик мог бы посоветовать козлятам попробовать добыть *дополнительную априорную информацию*, например, узнать цвет шерсти стоящего за дверью или длину его хвоста или определить наличие рогов...

Тогда бы козлятам не пришлось решать *некорректную* задачу методом «тыка», и они выбирали ли бы решение более *обоснованно* и с менее трагическими последствиями.
17. **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, аэрофотосъемки, 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 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 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.

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

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

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

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

19. **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.

20. **параметрические ВЭЗ** – электрические зондирования, выполненные на местах заложения скважин. В этом случае для полученной кривой ВЭЗ известен геологический разрез. В резуль-

тате появляется возможность выяснить значения УЭС горных пород вскрытых скважиной, оценить их контрастность и др.

21. **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.
22. **электрокаротаж** (электрический каротаж)– группа электро-разведочных 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.: издательство Московского Университета. 1984 г. С ил., 422 с.
2. **Электроразведка: пособие по электроразведочной практике для студентов геофизических специальностей**. Под редакцией проф. В.К. Хмелевского, доц. И.Н. Модина, доц. А.Г. Яковлева – М.: 2005.-311 стр.
3. В.М. Телфорд, Л.П.Гелдарт, Р.Е. Шерифф, Д.А. Кейс. **Прикладная геофизика**. М., Недра, 1980.
(перевод с английского)