

Иванов А.П., Скугаревская О.А. Методика частотных электромагнитных зондирований. М., "Наука", 1978, 140 с.

В книге рассматриваются вопросы методики частотных электромагнитных зондирований геологических структур и перспективности этого метода исследований применительно к задачам разведочной геофизики.

Анализируются особенности поведения электромагнитного поля в многослойных горизонтально-слоистых средах, кратко описываются методика частотных зондирований, приемы обработки, предварительного анализа и приближенной интерпретации полевого материала. Приводятся примеры применения частотных зондирований при решении конкретных геологических задач.

Книга рассчитана на инженеров-геофизиков, а также на студентов вузов и аспирантов геофизической специальности.

Табл. 5, ил. 91, список лит. 93 назв.

Ответственный редактор

кандидат физико-математических наук

О.М. БАРСУКОВ

И $\frac{20802-188}{055(02)-78}$ 92-78

© Издательство "Наука", 1978 г.

ВВЕДЕНИЕ

Частотные электромагнитные зондирования (ЧЭЗ) являются эффективным методом исследования геоэлектрического строения геологических структур. Этот метод впервые был предложен в Советском Союзе в конце 40-х годов (Краев, 1965; Тихонов, 1946, 1949, 1950а,б; Тихонов, Мухина, 1950) и интенсивно разрабатывался в основном в Академии наук СССР в 50-70-х годах.

Геологическая разведка методом ЧЭЗ имеет ряд существенных преимуществ по сравнению с электроразведкой на постоянном токе в отношении разрешающей способности, глубинности исследования и экономичности полевых работ. В отличие от дипольных зондирований на постоянном токе ЧЭЗ проводят на одном разносе между питающими и приемными цепями, но с использованием необходимого для данного геоэлектрического разреза диапазона частот. Однако основное преимущество частотных зондирований заключается в том, что с помощью этого метода оказывается возможным исследовать не только разрезы, содержащие плохо проводящие пласты, но и структуры в кристаллическом фундаменте на больших глубинах, что принципиально недоступно методам постоянного тока. Поэтому метод ЧЭЗ целесообразно использовать в первую очередь на высокоомных разрезах, а также в районах, где местные условия не позволяют применять пространственные (продольные) зондирования.

Сущность метода ЧЭЗ заключается в следующем. На поверхности Земли с помощью генератора переменного тока, подключаемого к заземленному электрическому или незаземленному магнитному

диполям, возбуждается электромагнитное поле. На измерительной установке, расположенной от генераторной на расстояниях, равных обычно 3-5 глубинам исследования, регистрируются амплитуды и фазы компонент поля поочередно на всех частотах рабочего диапазона, число которых выбирается в пределах от 20 до 30. Величины, определенные на приемной станции, сравниваются для каждой частоты с электрическими (или магнитными) моментами питающего диполя. Зависимость кажущегося сопротивления от частоты позволяет построить геоэлектрический разрез путем подбора соответствующей данному разрезу теоретической кривой. Необходимо отметить, что интерпретация кривых ЧЭЗ может проводиться в принципе беспараметрическим способом, т.е. без привлечения каких-либо дополнительных сведений о строении разреза. Это также одно из важных достоинств метода.

Методические исследования, проведенные в основном Институтом физики Земли АН СССР, Геологическим институтом АН СССР, а также ВНИИгеофизики Министерства геологии СССР, показали, что метод частотных зондирований можно эффективно использовать при изучении геологических структур в пределах от первых десятков метров до 3-5 км при зондированиях на платформах и до 10-20 км при зондированиях на щитах. К настоящему времени разработаны три модификации метода, предназначенные для разведки малых (2-50 м), средних (50-500 м) и больших (100-5000 м) глубин. Необходимость этих модификаций продиктована техническими и экономическими причинами.

Метод частотного зондирования развивался параллельно с методом становления поля и методом магнитотеллурического зондирования. Основоположителем всех этих методов является академик А.Н. Тихонов. Теория методов частотных зондирований и становления поля создавалась А.Н. Тихоновым, Г.В. Астраханцевым, Л.Л. Ваньяном, А.В. Вешевым, Л.Б. Гасаненко, В.И. Дмитриевым, А.П. Краевым, Г.В. Мухиной, В.А. Сидоровым, О.А. Скугаревской, В.В. Тикшае-

в, П.П. Фроловым, Д.Н. Четаевым, Д.Н. Шахсуваровым, М.Шейнманом и другими исследователями. Были рассчитаны теоретические кривые для многослойных геоэлектрических разрезов. Разработка методики и аппаратуры для частотных зондирований впервые была осуществлена в Институте физики Земли АН СССР под руководством профессора А.И. Заборовского и Б.С. Эненштейна (Заборовский, 1960; Эненштейн, Иванов, 1958; Эненштейн и др., 1961а,б). Работы в этом направлении проводились также в Ленинградском государственном университете под руководством М.В. Вешева и Л.Б. Гасаненко (Гасаненко, Шолто, 1960) и во ВНИИгеофизики под руководством А.М. Загармистра, Л.Л. Ваньяна, А.М. Алексеева и Л.З. Бобровникова (Ваньян, 1957, 1959, 1963, 1965).

Первый этап исследований в области методики и аппаратуры для частотных зондирований завершился в 1960 г. созданием в ИФЗ АН СССР первого образца станции для частотных зондирований СЧЗ-60 для работы в диапазоне частот от 0,1 до 120 Гц (Эненштейн и др., 1958в, 1961). В 1967 г. в Геологическом институте АН СССР были созданы более совершенный образец станции СЧЗ-67-Т на полупроводниках, работавший в диапазоне частот от 0,2 до 1083 Гц, аппаратура для среднеглубинных зондирований ВЧЗ-70-Т для работы в диапазоне частот от 2,1 до 8666 Гц и автоматическая станция для непрерывных частотных зондирований НЧЗ-64 в диапазоне частот от 60 до 10 000 Гц (Болталин и др., 1968а,б; Boltalin et al., 1968, 1969а, б,с; Эненштейн, Иванов, 1961; Иванов, 1975). В 1956 г. в Уральском филиале АН СССР под руководством Г.В. Астраханцева были начаты исследования по применению частотных зондирований для целей рудной разведки в диапазоне от 20 Гц до 100 кГц.

В разработке методики частотных зондирований активное участие принимали также Е.В. Зверева, К.П. Королева, Ю.С. Корольков, М.П. Корнейчик, Э.Л. Круль, Г.В. Молочнов, В.Н. Никитина, А.М. Пойраи-Кошиц, Н.И. Сорокин, Б.С. Светов, Е.И. Терехин, Ю.Д. Чижов и

другие исследователи. В разработке аппаратуры — Л.З. Бобровников, М.А. Иванов, Ю.Б. Карманов, Н.Н. Колесов, В.И. Макаров, В.Я. Пипур, В.А. Сновальщиков, Е.М. Ушаков, А.В. Федорова, Г.М. Филиппов и др.

В настоящее время исследования по частотным зондированиям проводятся в основном в Институте физики Земли АН СССР, Институте океанологии АН СССР, в Уральском и Кольском филиалах АН СССР, Московском и Ленинградском университетах, Центральном научно-исследовательском геологоразведочном институте Министерства геологии СССР и некоторых других организациях. За рубежом они проводятся в Венгерской Народной Республике и Франции. Аппаратура для непрерывных частотных зондирований серийно выпускается Мытищинским приборостроительным заводом (станция НЧЗ-73). Этим же заводом выпускается универсальная генераторная установка для работы методами частотного зондирования, становления поля и вызванной поляризации. Измерительные установки для работы методом ЧЭЗ на дискретных частотах не выпускаются. В 1976 г. в Институте физики Земли АН СССР разработана измерительная установка для работы методом ЧЭЗ на дискретных частотах в диапазоне от 0,2 Гц до 20 кГц, выполненная на современных интегральных схемах.

В заключение отметим, что объем исследований по частотным зондированиям, выполненный к настоящему времени, достаточно велик. Тем не менее многие вопросы методики и особенно интерпретации еще находятся в стадии разработки. Это обстоятельство, а также ограниченный объем книги не позволили авторам более детально рассмотреть ряд вопросов методики и интерпретации частотных зондирований. Поэтому настоящая работа ставит своей целью только ознакомление широкого круга геофизиков с основами этого метода в различных его аспектах.

Авторы пользуются случаем выразить благодарность доктору технических наук Б.С. Светову за поддержку при работе над книгой.

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ТЕОРИИ
МЕТОДА ЧАСТОТНЫХ ЗОНДИРОВАНИЙ

МОДЕЛЬ ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАЗРЕЗА

Описание геоэлектрических структур с помощью идеализированной модели горизонтально-слоистой среды является первым, но достаточно хорошим приближением к реальным условиям, особенно для платформенных областей. Кроме того, такая модель наиболее удобна для расчетов: позволяет с помощью одних и тех же алгоритмов находить теоретические кривые для большого разнообразия многослойных разрезов (Тихонов, Мухина, 1950; Шахсуваров, 1959а). Последнее обстоятельство дало возможность, в частности, оценить влияние на электромагнитное поле как высокоомных слоев различной мощности, так и хорошо проводящих прослоек в разрезах, а также выявить особенности, возможности, разрешающую способность и перспективность метода ЧЗ в целом. Знание особенностей распространения электромагнитного поля в горизонтально-слоистых средах лежит в основе разработки методики интерпретации результатов полевых измерений над любыми структурами, включая и неоднородные среды.

В модели горизонтально-слоистой среды Земля принимается за проводящее полупространство, характеризуемое удельным сопротивлением, которое произвольно изменяется с глубиной. Будем считать сопротивление кусочно-постоянной функцией, изменяющейся на границе раздела слоев (рис. 1.1). За нулевую границу принимается земная поверхность, рельеф Земли не учитывается. Счет слоев идет сверху вниз. Удельное сопротивление первого слоя обозначается через ρ_1 , мощность — через h_1 . Далее идут второй, третий, ..., m -й слой, подстилающее основание и n -й слой, имеющие соответственно сопротивления и мощности: $\rho_2, h_2; \rho_3, h_3; \dots; \rho_m, h_m; \dots; \rho_n, h_n = \infty$. Каждый слой можно характеризовать также проводимостью $\sigma_m = 1/\rho_m$. В экспериментальных работах принято рассматривать сопротивления различных пород, а в математических — их проводимости.

За подстилающее основание принимается слой, нижнюю границу которого уже нельзя определить при помощи частотных зондирований. В большом числе экспериментальных исследований подстилающим основанием служит кристаллический фундамент, который в этом случае считается однородным. Однако в общем случае фунда-

мент может в свою очередь иметь сложную структуру и состоять из областей, имеющих различное удельное сопротивление.

В методе ЧЭЗ используется диапазон частот, для которого можно пренебречь токами смещения по сравнению с токами проводимости. Поэтому диэлектрические постоянные слоев разреза не учитываются. Кроме того, изучаются среды немагнитные, для которых значение магнитной проницаемости можно считать величиной постоянной и равной магнитной проницаемости вакуума ($\mu = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м). Таким образом, каждый слой разреза в рассматриваемой модели характеризуется двумя основными параметрами: удельным сопротивлением ρ_m и мощностью h_m .

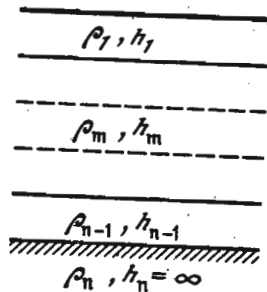


Рис. 1.1. Модель геологического многослойного разреза

Удельные сопротивления и мощность — это фактические параметры или характеристики разреза, измеряемые соответственно в ом-метрах и метрах. При расчетах каждый слой разреза характеризуют безразмерными параметрами $\mu_m = \rho_m / \rho_1$ и $\nu_m = h_m / h_1$, использование которых дает возможность изучать особенности переменных полей и проводить интерпретацию полевых измерений на ограниченном количестве теоретических кривых в соответствии с критерием подобия.

Кроме величин μ_m и ν_m каждый слой разреза в случае переменных полей характеризуется еще добавочным по сравнению с методами постоянного тока параметром — волновым числом $k_m = k_m^{(1)} + ik_m^{(2)}$. В случае пренебрежения токами смещения

$$k_m^{(2)} = i\omega\mu\sigma_m, \quad k_m^{(1)} = k_m^{(2)} = \frac{\sqrt{\omega\mu\sigma_m}}{\sqrt{2}}. \quad (1.1)$$

При расчетах удобно рассматривать также длину волны в метрах в каждом слое m :

$$\lambda_m = \frac{2\pi}{k_m^{(1)}} = \frac{2\pi\sqrt{2}}{\sqrt{\omega\mu\sigma_m}} = \sqrt{\frac{10^7 \rho_m}{f}}. \quad (1.2)$$

В (1.2) сопротивление ρ_m измеряется в ом-метрах, а частота f — в герцах. Тогда длина волны λ_m будет выражаться в метрах.

в использовании безразмерных параметров длину волны выражать в единицах мощности рассматриваемого слоя. Обозначим $\xi_m = \lambda_m / h_m$. В частности, для первого слоя разреза $\xi_1 = \lambda_1 / h_1 = \xi$. Волна в каждом слое выражается через длину волны в этом слое по формуле

$$\xi_m = \frac{\lambda_m}{h_m} = \xi \frac{\sqrt{\mu_m}}{\nu_m}. \quad (1.3)$$

Кроме рассмотренных параметров большое практическое значение имеют интегральные характеристики разреза, являющиеся суммарными параметрами, введенные в свое время в практику электроразведки постоянным током и используемые также при интерпретациях в методе ЧЗ. К ним относятся:

1. Суммарная мощность всех слоев разреза

$$H = \sum_{m=1}^{n-1} h_m, \quad (1.4)$$

в которой подразумевается глубина залегания кровли фундамента, если строение самого фундамента не изучается.

2. Суммарная продольная проводимость разреза

$$S = H / \rho_1. \quad (1.5)$$

При этом для каждого слоя номера m будем иметь отношение

$$S_m = h_m / \rho_m.$$

3. Среднее продольное сопротивление разреза

$$\rho_l = \frac{\sum_{m=1}^{n-1} h_m}{h_1 / \rho_1 + h_2 / \rho_2 + \dots + h_{n-1} / \rho_{n-1}}. \quad (1.6)$$

4. Среднее поперечное сопротивление

$$T = \frac{\sum h_m \rho_m}{\sum h_m}. \quad (1.7)$$

Соответственно для каждого слоя разреза

$$T_m = h_m \rho_m.$$

Использование характеристик S , T и ρ_l связано с необходимостью замены в ряде случаев многослойного разреза с параметрами ρ_m, h_m ($m = 1, 2, \dots$) одним эффективным слоем, имеющим мощность H и сопротивление ρ_l .

✓ МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
МЕТОДА ЧАСТОТНЫХ ЗОНДИРОВАНИЙ

Математическая задача в методе ЧЗ относится к вопросам электродинамики и трактуется как решение уравнений Максвелла

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \sigma \vec{E}, \quad \operatorname{div} \sigma \vec{E} = 0; \quad (1.8)$$

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t}, \quad \operatorname{div} \mu \vec{H} = 0$$

для квазистационарного приближения, т.е. предположения, что в проводящей среде токи смещения не учитываются в сравнении с токами проводимости и рассматриваются расстояния между источниками и приемниками, много меньшие длины волны в воздухе.

В (1.8) \vec{E} — напряженность электрического поля, \vec{H} — напряженность магнитного поля. На границах раздела слоев разреза имеет место непрерывность тангенциальных компонент вектора \vec{E} и непрерывность вектора \vec{H} . Кроме того, должны удовлетворяться условия возбуждения поля и принцип излучения на бесконечности.

Будем рассматривать случай возбуждения электромагнитного поля горизонтальным гармоническим электрическим диполем, расположенным на поверхности Земли. Используем систему координат XYZ, считая, что источник поля помещен в центре системы координат в направлении оси OX. Ось OZ направим вверх. Верхнее полупространство $z > 0$ (воздух) будем считать изолятором. Нижнее $z \leq 0$ — горизонтально-слоистой средой.

Гармонический ток записывается в виде

$$I = I_0 \sin(\omega t + \phi_0). \quad (1.9)$$

Полагая $\phi_0 = 0$, получим

$$I = I_0 \sin \omega t.$$

Электромагнитное поле будет также изменяться по гармоническому закону и распространяться со сдвигом фаз по отношению к фазе питающего тока. В частности, для компонент E_x и H_z будем иметь

$$E_x = E_x^0 \sin(\omega t + \phi_0), \quad H_z = H_z^0 \sin(\omega t + \phi_M). \quad (1.10)$$

При расчетах удобно перейти к комплексным величинам, приняв, что векторы \vec{E} и \vec{H} (а следовательно, и их компоненты) изменяются по закону

$$\vec{U} = \vec{U}_0 e^{-i\omega t}, \quad (1.11)$$

где $\vec{U} = \vec{E}, \vec{H}$.

При расчетах комплексной амплитуды находят действительную амплитуду поля и его фазу. В частности, для компоненты поля E_x (аналогично и для H_z и H_y) будем иметь

$$E_x^* = E_0 (\cos \phi - i \sin \phi) = \operatorname{Re} E_x^* + i \operatorname{Im} E_x^*, \quad (1.12)$$

где

$$\operatorname{Re} E_x^* = E_0 \cos \phi, \quad \operatorname{Im} E_x^* = -E_0 \sin \phi. \quad (1.13)$$

Из (1.13) получим

$$E_0 = \sqrt{(\operatorname{Re} E_x^*)^2 + (\operatorname{Im} E_x^*)^2}, \quad \phi = \operatorname{arctg} \left(-\frac{\operatorname{Im} E_x^*}{\operatorname{Re} E_x^*} \right). \quad (1.14)$$

Для нахождения комплексной амплитуды подставим (1.10) в уравнения Максвелла. После сокращения на множитель $e^{-i\omega t}$ получим уравнения для комплексных амплитуд:

$$\operatorname{rot} \vec{H}^* = \sigma \vec{E}^*, \quad \operatorname{div} \vec{E}^* = 0;$$

$$\operatorname{rot} \vec{E}^* = i\omega \mu \vec{H}^*, \quad \operatorname{div} \vec{H}^* = 0.$$

(В дальнейшем значок * будем опускать.) Дополнительные условия для комплексных амплитуд те же, что и для векторов поля \vec{E} и \vec{H} .

При решении поставленной задачи и проведении расчетов компоненты поля E_x , H_y и H_z выражаются через интегральные представления от функций Бесселя $J_m(\lambda r)$, $m = 0, 1$, и вспомогательных функций, являющихся решением краевых задач для обыкновенного дифференциального уравнения. Электромагнитное поле рассчитывается в плоскости $Z = 0$ (на поверхности Земли) в зависимости от относительной длины волны в первом слое разреза λ_1/h_1 при фиксированном расстоянии от источника.

Остановимся на экваториальной установке, получившей наибольшее распространение на практике, в которой приемный диполь располагается параллельно питающему с центром на оси OY на расстоянии $r = y$ ($x = 0, z = 0$). В этом случае (Дмитриев, 1965)

$$E_x = \frac{i\omega\mu I l}{2\pi} \left\{ \int_0^\infty J_0(\lambda y) u_0(\lambda) \lambda d\lambda - \frac{1}{k_1^2 y_0} \int_0^\infty J_1(\lambda y) [v_0(\lambda) + k_1^2 u_0(\lambda)] d\lambda \right\}, \quad (1.15)$$

$$H_z = \frac{I l}{2\pi} \int_0^\infty J_1(\lambda y) u_0(\lambda) \lambda^2 d\lambda, \quad (1.15a)$$

$$H_y = \frac{I l}{2\pi} \left\{ \frac{1}{y} \int_0^\infty J_1(\lambda y) u_0(\lambda) \lambda d\lambda - \int_0^\infty J_0(\lambda y) u_0(\lambda) \lambda^2 d\lambda \right\}, \quad (1.16)$$

где $u_0 = u(\lambda, z)|_{z=0}$, $v_0 = v(\lambda, z)|_{z=0}$ — значения функций u и v на

поверхности Земли. Вспомогательные функции $u(z, \lambda)$ и $v(z, \lambda)$ являются решениями следующих краевых задач. Они удовлетворяют уравнениям:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = a^2 u = 0, \quad \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} = a^2 v = 0, \quad (1.17)$$

$$a^2 = \lambda^2 - k^2, \quad \text{Re } a > 0,$$

и дополнительным условиям: на границе раздела слоев разреза при $z = z_m$ ($m = 1, 2, \dots, n-1$) будут непрерывными

$$u(z), \quad v(z), \quad \frac{\partial u}{\partial z}, \quad \frac{1}{k} \frac{\partial v}{\partial z}. \quad (1.18)$$

На границе раздела Земля-воздух, т.е. в плоскости, где помещен источник (при $z = 0$), имеют место условия

$$\frac{\partial u_0}{\partial z} + \lambda u_0 = 1, \quad (1.19)$$

$$v_0 = 1; \quad (1.20)$$

на бесконечности функции $u(z, t)$ и $v(z, t)$ стремятся к нулю.

Таким образом, определение компонент поля сводится к разработке алгоритмов для решения краевых задач (1.17) - (1.20) для функций u и v , а также к численному расчету интегралов типа

$$\int_0^\infty J_m(\lambda y) F(\lambda) d\lambda, \quad m = 0, 1. \quad (1.21)$$

Расчет теоретических кривых частотных зондирований может быть выполнен только на электронно-вычислительных машинах вследствие сложности и большого объема расчетов.

Первый алгоритм расчета поля диполя в слоистой среде при произвольном числе слоев и любых значениях их сопротивлений был дан А.Н. Тихоновым и Д.Н. Шахсуваровым (1956). В дальнейшем разработка метода и алгоритмов расчета была продолжена рядом исследователей (Ваньян, 1965; Дмитриев, 1965), обобщена на случаи анизотропных сред (Тихонов, 1959; Четаев, 1962) и градиентных сред (Дмитриев, 1968, 1969). В связи с задачей изучения внутреннего строения фундамента был предложен способ расчета частотных кривых для разрезов, содержащих мощные высокоомные слои (Дмитриев и др., 1974, 1975). Были развиты также алгоритмы расчета высокочастотной асимптотики электромагнитного поля в дальней зоне, когда расчеты теоретических кривых сильно упрощаются, и показано, что асимптотики электрического и магнитного поля с точностью до нормирующего множителя совпадают

сред, не имеющих непроводящего слоя конечной мощности, и сильно различаются при наличии в разрезе слоя-изолятора. В последнем случае электрическое поле существенно зависит от разности Дмитриев и др., 1970; Тихонов, Скугаревская, 1959; Тихонов, Шахсуваров, 1959).

Большой объем расчетов теоретических частотных кривых начавшая с 1962 г. был выполнен НИ ВЦ МГУ совместно с ГИН АН СССР. При этом использовались алгоритмы, предложенные И.И. Дмитриевым. Расчеты проводятся как с целью теоретического изучения особенностей распространения электромагнитного поля в различных геоэлектрических условиях и выяснения разрешающей способности и возможностей использования метода ЧЗ для решения задач структурной и разведочной геофизики, так и для разработки методики интерпретации полевых материалов. Рассчитываются также систематизированные таблицы и палетки для типичных моделей слоистых сред.

В настоящее время исследование геоэлектрического разреза методом ЧЗ производится в основном по двум компонентам поля - E_x и H_z при возбуждении электромагнитного поля горизонтальным электрическим диполем. Однако для решения ряда задач целесообразно измерять отношения компонент E_x/H_y и H_z/H_y , а также возбуждать поле незаземленным вертикальным магнитным диполем (Свегов и др., 1976 а, б). При зондированиях негоризонтально-слоистых сред - измерять компоненту поля E_y , которая в случае зондирования горизонтально-слоистых сред с помощью экваториальной дипольной установки равна нулю и отлична от нуля в разрезах, содержащих негоризонтальные напластования или другие неоднородности. Отношение компонент E_x/E_y может служить мерой отклонения структуры разреза от горизонтально-слоистой.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ НАД ОДНОРОДНЫМ ПОЛУПРОСТРАНСТВОМ

В случае однородного полупространства интегралы, входящие в (1.14) - (1.16), легко вычисляются и компоненты поля выражаются через табулированные функции по формулам

$$E_x^0 = -\frac{i \omega \mu I l}{2 \pi k^2 y^3} \left[2 - (1 - iky) e^{iky} \right], \quad (1.22)$$

$$H_z^0 = -\frac{3I l}{2 \pi k^2 y^4} \left[1 - \left(1 - iky - \frac{k^2 y^2}{3} \right) e^{iky} \right], \quad (1.23)$$

$$H_y^0 = \frac{I l}{2 \pi y^2} \{ 3K_1(x) I_1(x) - x [I_0(x) K_1(x) - I_1(x) K_0(x)] \}, \quad (1.24)$$

где $I_m(x)$ и $K_m(x)$, $m = 0, 1$, являются модифицированными функ-

циями Бесселя от аргумента

$$x_0 = \frac{iky}{2} \frac{(1-i)y\sqrt{\omega\mu\sigma'}}{2\sqrt{2}} \quad (1.25)$$

а l — длина питающего дipoля.

КАЖУЩЕЕСЯ СОПРОТИВЛЕНИЕ НА ПЕРЕМЕННОМ ТОКЕ

Электромагнитное поле в методе ЧЗ зависит от параметров, характеризующих разрез, от типов и характеристик питающих и приемных диполей, а также от расстояния между ними. При проведении расчетов теоретических кривых и при интерпретации результатов зондирований целесообразно рассматривать нормированное поле, выраженное в безразмерных величинах, исключив параметры, непосредственно не связанные с разрезом, в частности характеристики источника и приемника. Могут быть предложены различные нормировки в зависимости от условий эксперимента и тех задач, которые ставятся при проведении зондирований. В настоящее время в методе ЧЗ используется нормировка по полю в высокочастотной области над однородным полупространством (нормировка по дальней зоне). При этом вводится понятие кажущегося сопротивления на переменном токе.

Остановимся сначала на нормировке электрической составляющей поля E_x . Для этого в выражении (1.22) для компоненты E_x^0 , рассчитанной для однородного полупространства, положим $|k|y \gg 1$. Тогда

$$E_x^0 = -\frac{i\omega\mu ll}{\pi k^2 y^3} = -\frac{ll}{\pi y^3} \rho_1 \quad (1.26)$$

Если для однородного полупространства ввести нормированное поле

$$\tilde{E}_x^0 = E_x^0 \frac{\pi y^3}{ll} \quad (1.27)$$

то в высокочастотной области получим, что удельное сопротивление полупространства равно модулю нормированного поля:

$$\rho_1 = |\tilde{E}_x^{(0)}|.$$

Нормировку (1.27) распространим на случай многослойной среды для любых частот, введя понятие кажущегося сопротивления по электрическому полю $\rho_\omega = \rho_\Omega$, т.е. положим

$$\rho_\Omega = |E_x| \frac{\pi y^3}{ll} = |\tilde{E}_x|, \quad (1.28)$$

где E_x — электрическое поле, измеренное на поверхности слоистой среды. Заметим, что понятие кажущегося сопротивления на перемен-

ном токе введено по аналогии с понятием кажущегося сопротивления ρ_k , рассматриваемым при зондировании полем постоянного тока. Однако в отличие от величины ρ_k на постоянном токе кажущееся сопротивление на переменном токе ρ_ω дополнительно является функцией частоты и при частотных зондированиях будет изменяться в зависимости от ее значения.

В области высоких частот кажущееся сопротивление ρ_ω совпадает с сопротивлением первого слоя разреза, т.е. $\rho_\omega = \rho_1$. По мере понижения частоты ρ_ω будет уже отличаться от истинного сопротивления среды, но изучение характера изменения величины ρ_ω от частоты позволяет проводить интерпретацию экспериментальных кривых и тем самым определять значения мощностей и удельных сопротивлений слоев, слагающих исследуемый разрез.

Аналогично нормируется и компонента поля H_z . В выражении (1.23) для компоненты магнитного поля H_z^0 над однородным полупространством, положив $|k|y \gg 1$, получим

$$H_z^0 = \frac{3Il}{2\pi k^2 y^4} = i \frac{3Il}{2\pi\omega\mu y^4} \rho_1 \quad (1.29)$$

Тогда нормированное поле

$$\tilde{H}_z^{(0)} = H_z^0 \frac{2\pi\omega\mu y^4}{3Il} \quad (1.30)$$

тогда в высокочастотной области для однородного полупространства

$$\rho_1 = |\tilde{H}_z^{(0)}|.$$

Для многослойной среды будем иметь

$$\tilde{H}_z = H_z \frac{2\pi\omega\mu y^4}{3Il} \quad (1.31)$$

$$\rho_\omega = \rho_M = |H_z| \frac{2\pi\omega\mu y^4}{3Il} = |\tilde{H}_z|. \quad (1.32)$$

Нормировку для компоненты H_y получим, положив в (1.24) $|k|y \gg 1$. Используя асимптотические выражения для функций Бесселя I_n и K_n при больших значениях аргумента, будем иметь для однородного полупространства

$$H_y^{(0)} = \frac{Il}{2\pi y^2} \frac{2\sqrt{2}}{(1-i)y\sqrt{\omega\mu}} \sqrt{\rho_1^2} \quad (1.33)$$

откуда

$$\sqrt{\rho_1^2} = |H_y^{(0)}| \frac{\pi y^3 \sqrt{\omega\mu}}{Il}, \quad \rho_1 = |H_y^{(0)}|^2 \frac{\pi^2 y^6 \omega\mu}{l^2 l^2} \quad (1.34)$$

Для слоистой среды введем кажущееся сопротивление $\rho_{\omega} = \rho_{H_y}$ по формуле

$$\rho_{H_y} = |H_y|^2 \frac{\pi^2 y^6 \omega \mu}{I^2 l^2} \quad (1.35)$$

Таким образом, в методе ЧЗ кажущееся сопротивление вводится для каждой компоненты поля. Вследствие того, что нормировка поля связана с умножением на действительную величину, фаза нормированного поля будет совпадать с фазой ненормированного.

Теоретические частотные кривые кажущегося сопротивления рассчитываются в виде относительных кажущихся сопротивлений:

$$\bar{\rho}_{\vartheta} = \frac{\rho_{\vartheta}}{\rho_1} = \frac{\pi y^3}{I l \rho_1} |E_x|, \quad (1.36)$$

$$\bar{\rho}_M = \frac{\rho_M}{\rho_1} = \frac{2\pi \omega \mu y^4}{3 I l \rho_1} |H_z|, \quad (1.37)$$

$$\bar{\rho}_{H_y} = \frac{\rho_{H_y}}{\rho_1} = \frac{\pi^2 \omega \mu y^6}{I^2 l^2 \rho_1} |H_y|^2. \quad (1.38)$$

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПОЛЕЙ В МЕТОДЕ ЧАСТОТНЫХ ЗОНДИРОВАНИЙ

Построение палеток кажущегося сопротивления

Теоретические частотные кривые кажущегося сопротивления строятся в виде зависимости $\bar{\rho}_{\omega} = \rho_{\omega} / \rho_1$ от величины $\xi = \lambda_1 / h_1$ или $\xi_r = \lambda_1 / r$. Каждая кривая рассчитывается для фиксированного разноса, нормированного в случае многослойной среды мощностью первого слоя, и строится в билогарифмическом масштабе. Обычно на палетке объединяются кривые, рассчитанные для одного и того же разреза, но нескольких различных разносов. При построении фазовых кривых по оси OX откладываются значения λ_1 / h_1 или λ_1 / r в логарифмическом масштабе, а по оси OY — значения фаз в градусах или радианах в линейном масштабе.

Мы рассмотрим палетки кажущегося сопротивления по двум компонентам электромагнитного поля E_x и H_z , так как кривые $\bar{\rho}_{\vartheta}$ и $\bar{\rho}_M$ используются в основном в настоящее время на практике, и приведем в качестве примера фазовые кривые ϕ_{ϑ} и ϕ_M только для двуслойного разреза, имеющего непроводящее основание. Остановимся на типичных геоэлектрических разрезах.

Однородное полупространство

Теоретические кажущиеся сопротивления $\bar{\rho}_M$ и $\bar{\rho}_{\vartheta}$ для однородного полупространства представлены на рис. 1.2. Заметим, что к кривым однородного полупространства сводятся кривые как $\bar{\rho}_M$, так и $\bar{\rho}_{\vartheta}$ для линейных разрезов, если зондирования проводят на разносах, пропорциональных мощности верхнего слоя, когда нижняя граница этого слоя сводится к поверхности.

Сведение кривых $\bar{\rho}_M$ в кривые однородного полупространства для линейных разрезов ($r/h_1 < 1$) можно проследить по приведенным

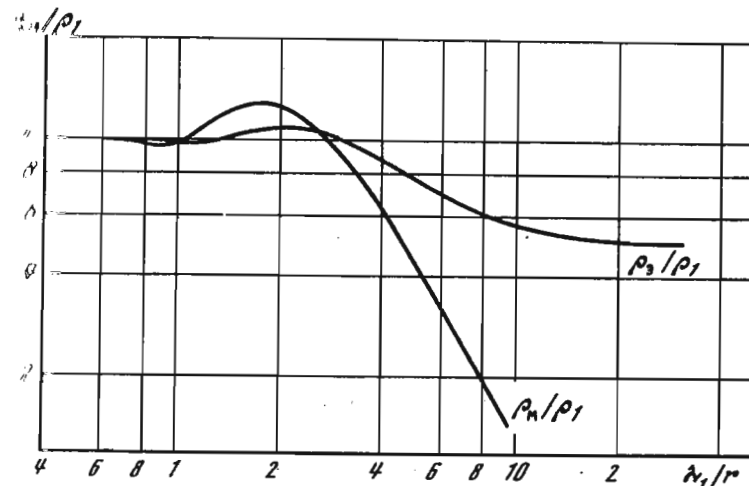


Рис. 1.2. Теоретические кривые ЧЗ для однородного полупространства

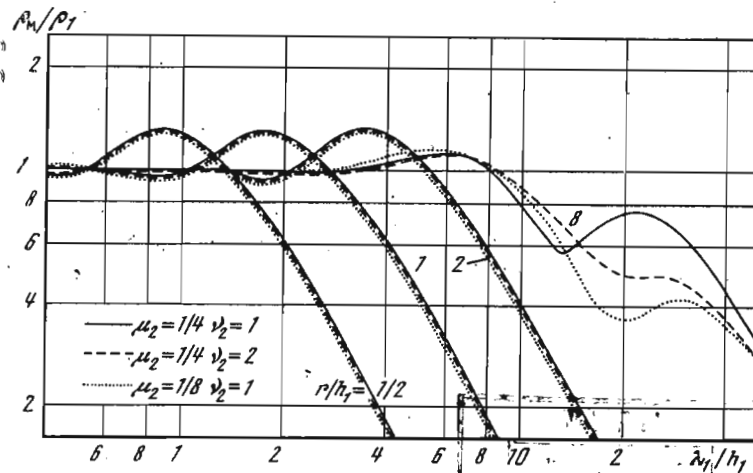


Рис. 1.3. Теоретические трехслойные кривые ЧЗ

на рис. 1.3 кривым для трехслойных разрезов, характеризующихся параметрами:

$$\mu_1 = 1, \quad \nu_1 = 1;$$

$$\mu_2 = 1/4, \quad \nu_2 = 1;$$

$$\mu_2 = 1/4, \quad \nu_2 = 2;$$

$$\mu_2 = 1/8, \quad \nu_2 = 1;$$

$$\mu_3 = \infty, \quad \nu_3 = \infty.$$

Таким образом, в рассматриваемом нами примере выбраны разрезы, у которых второй слой имеет либо разную мощность ($\nu_2 = 1; 2$), либо различное сопротивление ($\mu_2 = 1/4; 1/8$) при совпадении остальных параметров. Как показывают графики, кривые $\bar{\rho}_M$, рассчитанные для разноса $r/h_1 = 8$ ($r/H = 2,7; 4; H = h_1 + h_2$), существенно отличаются друг от друга, отображая различные трехслойные разрезы. Остальные же кривые, полученные при разносах $r/H = 1/6 + 1$, сливаются для всех трех разрезов. Аналогичное явление будет иметь место и для кривых электрического поля.

Двуслойный разрез

Двуслойный геоэлектрический разрез представляет собой электрически однородный слой удельного сопротивления ρ_1 и мощности h_1 , лежащий на основании удельного сопротивления ρ_2 и мощности $h_2 = \infty$. Его безразмерные параметры: $\mu_1 = 1, \nu_1 = 1; \mu_2 = \rho_2/\rho_1, \nu_2 = \infty$. Характеристикой двуслойного разреза является параметр μ_2 , который может принимать любые значения.

Рассмотрим теоретические кривые кажущихся сопротивлений $\bar{\rho}_M = \rho_M/\rho_1$ и $\bar{\rho}_3 = \rho_3/\rho_1$ (рис. 1.4). При этом на примере двуслойного разреза отметим некоторые свойства частотных кривых, общие для любых многослойных разрезов. На рис. 1.4, а представлена палетка кажущегося сопротивления по магнитному полю, т.е. палетка $\bar{\rho}_M$, рассчитанная для разреза, имеющего изолирующее основание $\mu_2 = \infty$. По оси абсцисс отложена величина λ_1/h_1 . Приведенные кривые рассчитаны для значений разноса $r/h_1 = 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 10, 15, 20, \infty$. Все кривые имеют левую горизонтальную асимптоту $\bar{\rho}_M = 1$. Такую же асимптоту имеют кривые $\bar{\rho}_\omega$ для любых разрезов. На кривых можно выделить интерференционный минимум $(\bar{\rho}_M)_{\min}$, лежащий в области сравнительно высоких частот (или малых значений λ_1/h_1), и максимум $(\bar{\rho}_M)_{\max}$ — восходящую и ниспадающую правую ветви. Значения $(\bar{\rho}_M)_{\min}$ и $(\bar{\rho}_M)_{\max}$ — характерные точки кривой, и та часть кривой, в которую эти точки включаются, является наиболее удобной для использования при интерпретации. В зависимости от разноса характерная часть кривой будет соответствовать различному участку относительных длин волн λ_1/h_1 и, следовательно, различному частотному диапазону.

На палетке проведена линия S . Она является правой асимптотой кривой для бесконечного разноса в случае, когда подстилающее основание — изолятор. Для любого многослойного разреза линия S является осью λ_1/h_1 в точке $(\lambda_1/h_1)_0 = 2\pi \sum \nu_i / \mu_i$ (i — номер слоя) и перпендикулярна к этой оси под углом $\phi = 63^\circ 26'$. (Для двуслойного разреза $(\lambda_1/h_1)_0 = 2\pi$).

Максимум и ниспадающая правая ветвь кривой $\bar{\rho}_M$, рассчитанной для конечного разноса, относятся к низкочастотной асимптотике. Левая асимптота кривой $\bar{\rho}_M$ находится по формуле

$$\frac{\omega \mu r^2}{6\rho_1},$$

$$\bar{\rho}_M = \frac{4}{3} \pi^2 \left(\frac{r}{h_1} \right)^2 \frac{1}{\xi^2} \quad (1.39)$$

Таким образом, правой асимптотой кривой $\bar{\rho}_M$ будет прямая, наклоненная к оси OX под углом $\phi = -63^\circ 26'$. Правые асимптоты кривых $\bar{\rho}_M$, рассчитанные для различных разносов, параллельны между собой. Каждая асимптота пересекает ось λ_1/h_1 в точке

$$\left(\lambda_1/h_1 \right)^* = \frac{2\pi}{\sqrt{3}} \frac{r}{h_1} \quad (1.40)$$

Используя (1.39) и (1.40), можно провести правую асимптоту кривой $\bar{\rho}_M$ для любого r/h_1 . При этом значения $(\lambda_1/h_1)^*$ в точке пересечения правых асимптот с осью λ_1/h_1 будут определяться только величиной разноса. На рис. 1.4 низкочастотная асимптота проведена к кривой, оцифрованной значением $r/h_1 = 4$.

На рис. 1.4, б приведена палетка кажущегося сопротивления $\bar{\rho}_3 = \rho_3/\rho_1$, рассчитанная по электрическому полю также для слоя, подстилаемого изолятором. Следует отметить две основные особенности кривых $\bar{\rho}_3$ в этом случае: наличие интерференционного минимума в высокочастотной части кривой, так же как у кривых магнитного поля, и переход при $\lambda_1/h_1 \rightarrow \infty$ к горизонтальной асимптоте, когда кажущееся сопротивление принимает значение $\bar{\rho}_{\text{стац}} = \bar{\rho}_K/2 = r/2h_1$ ($\bar{\rho}_K$ — кажущееся сопротивление на постоянном токе). Отметим, что для любого многослойного разреза $\bar{\rho}_{\text{стац}}$ будет соответствовать отношению поля постоянного тока при дипольном зондировании на том же разносе. С учетом нормировки полей $\bar{\rho}_{\text{стац}} = \bar{\rho}_K/2$.

Сравнение между собой кривых $\bar{\rho}_M$ и $\bar{\rho}_3$ для одинаковых разносов показывает, что значение λ_1/h_1 в минимуме кривой $\bar{\rho}_3$ и в ниспадающей правой ветви кривой $\bar{\rho}_M$ совпадают. Значение $\bar{\rho}_M$ в максимуме меньше, чем $(\bar{\rho}_3)_{\max}$ для разносов $r/h_1 > 2$.

На рис. 1.4, в, г приведены палетки для двуслойного разреза с идеально проводящим основанием ($\mu_2 = 0$). Как показывают графики,

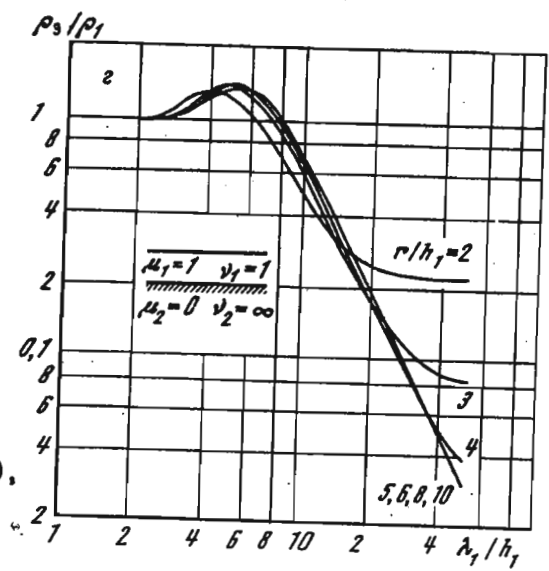
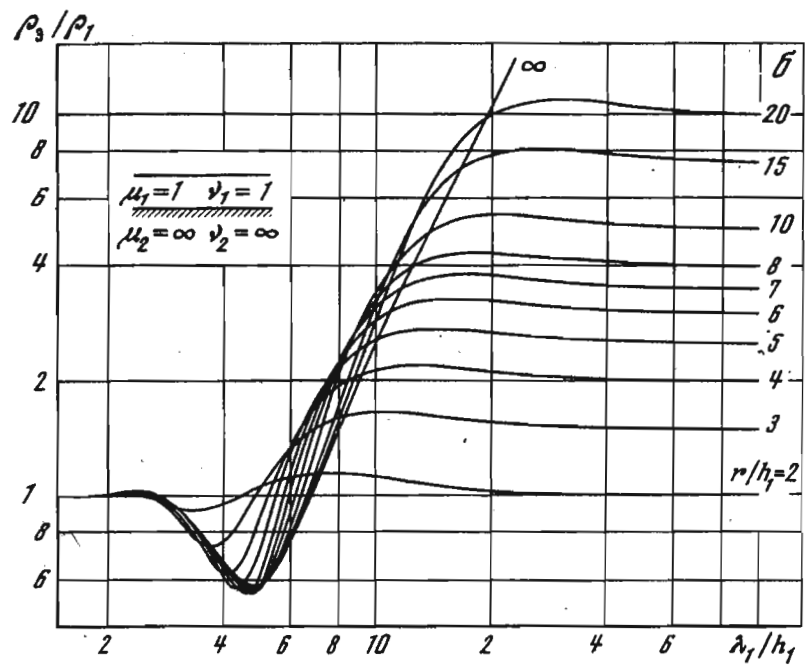
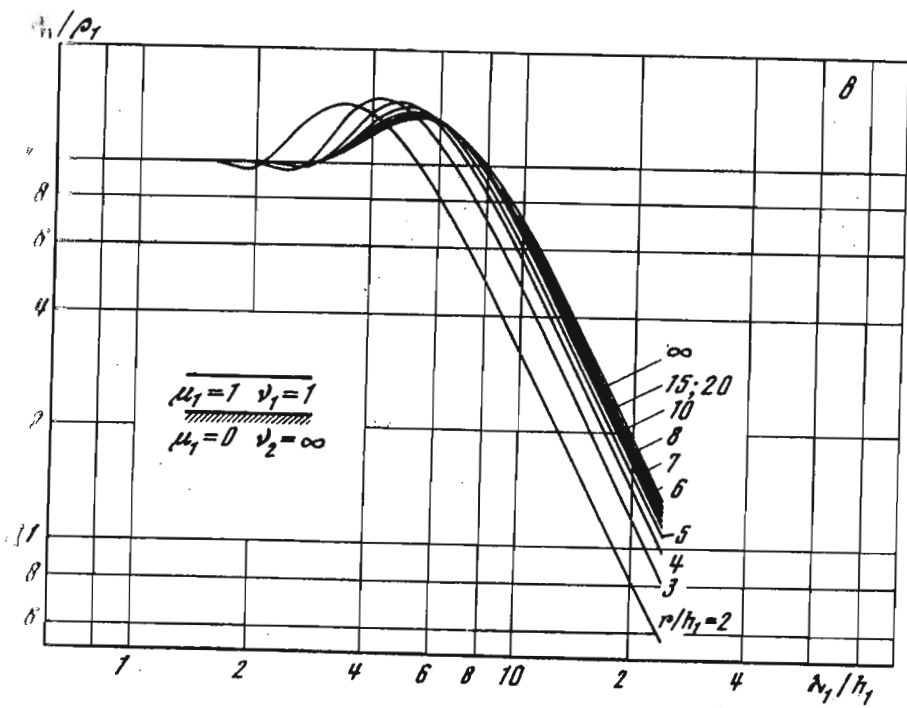
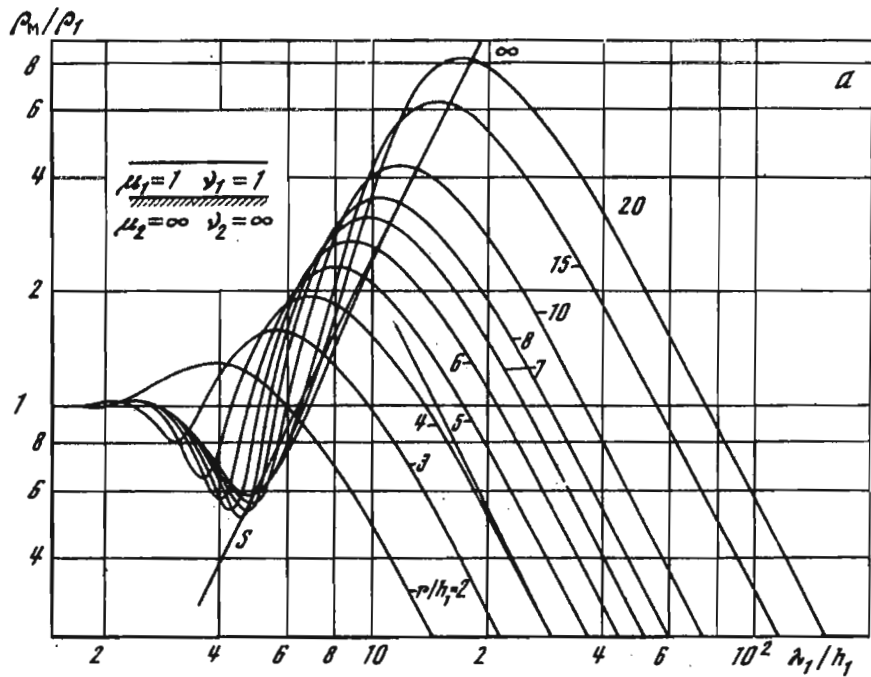


Рис. 1.4. Теоретические двуслойные кривые ЧЗ по составляющим поля H_z при $\mu_2 = \infty$ (а), E_x при $\mu_2 = \infty$ (б), H_z при $\mu_2 = 0$ (в), E_x при $\mu_2 = 0$ (г)

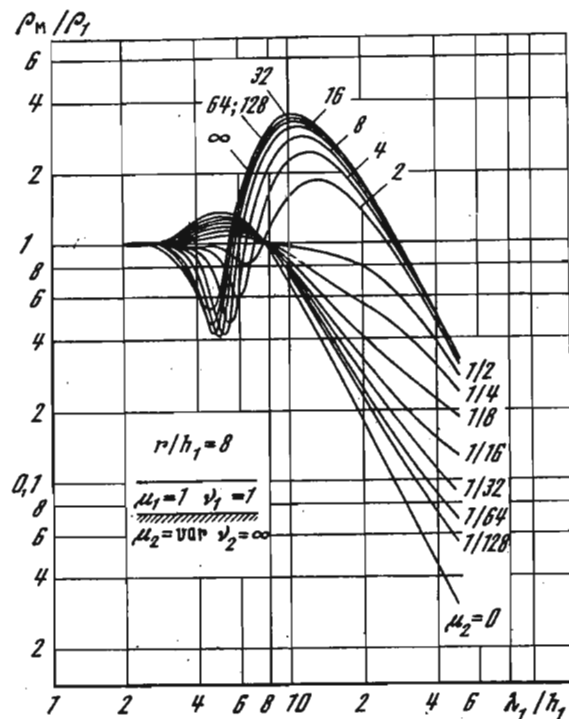


Рис. 1.5. Теоретические двуслойные кривые ЧЗ по составляющей поля H_z при $\mu_2 = \text{var}$

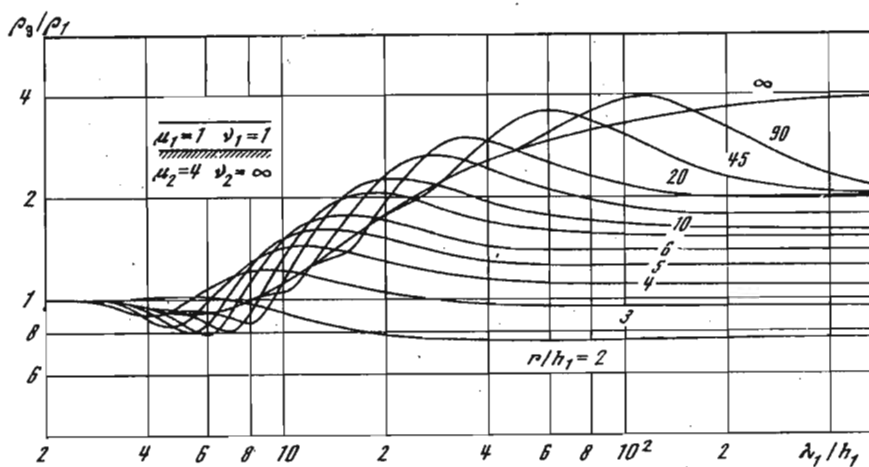


Рис. 1.6. Теоретические двуслойные кривые ЧЗ по составляющей поля E_x при $\mu_2 = 4$

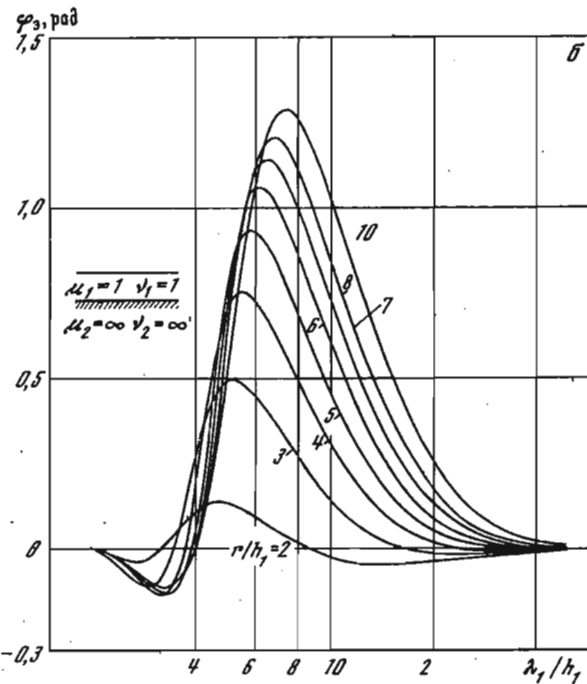
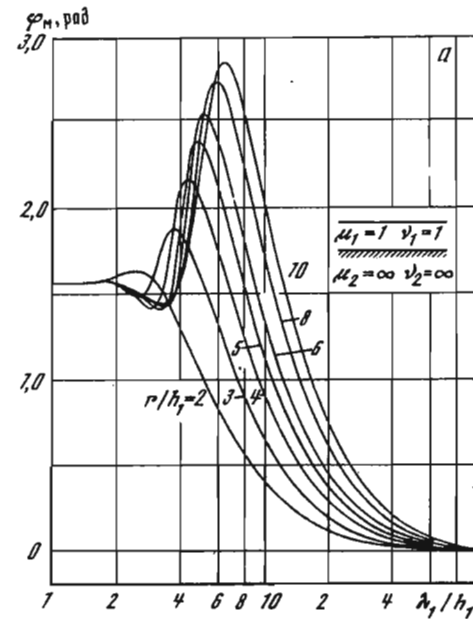


Рис. 1.7. Теоретические фазовые двуслойные кривые ЧЗ по составляющим поля H_z (а) и E_x (б)

кривые $\tilde{\rho}_M$ и $\tilde{\rho}_3$ в этом случае не имеют характерного минимума в высокочастотной области в противоположность случаю разреза с изолирующим основанием и слабо дифференцируются в зависимости от разноса. Для кривых $\tilde{\rho}_3$ характерным является переход ниспадающей правой ветви к горизонтальной асимптоте в зависимости от разноса при различных значениях λ_1/h_1 .

Мы рассмотрели кратко кривые кажущихся сопротивлений $\tilde{\rho}_M$ и $\tilde{\rho}_3$ для двуслойных разрезов с предельными значениями сопротивлений подстилающего основания: изолятора и идеального проводника. Естественно ожидать постепенную деформацию кривой как $\tilde{\rho}_M$, так и $\tilde{\rho}_3$ для разрезов с промежуточными значениями μ_2 при переходе от значений $\mu_2 = \infty$ к значению $\mu_2 = 0$. На рис. 1.5 в качестве примера приведена палетка $\tilde{\rho}_M$, рассчитанная для серии двуслойных разрезов с основанием, имеющим сопротивления $\mu_2 = \infty; 128; 64; 32; 16; 8; 4; 2; 1/2; 1/4; 1/8; 1/16; 1/32; 1/128; 0$ (Тихонов и др., 1973).

Изменение сопротивления значительно влияет как на положение, так и на величину минимума кривой $\tilde{\rho}_M$ в случае, когда $\mu_2 > 1$. При этом для более проводящего основания минимум смещается вправо по оси λ_1/h_1 . Величина $(\tilde{\rho}_M)_{\max}$ при $\mu_2 > 1$, а также наклон ниспадающей ветви как для $\mu_2 < 1$, так и для $\mu_2 > 1$ с уменьшением μ_2 , начиная от $\mu_2 = \infty$, сперва изменяется незначительно, но затем весьма резко.

В заключение отметим еще одно свойство частотных кривых. При больших значениях разноса r/h_1 интерференционный минимум в высокочастотной части кривой выполаживается. Кривая в начальной части совпадает с кривой для бесконечного разноса. Это совпадение имеет место на весьма значительном интервале изменения λ_1/h_1 , который увеличивается с ростом разноса. Указанное свойство кривых, иллюстрируемое на рис. 1.6 палеткой двуслойного разреза $\mu_2 = 4$, справедливо для любых многослойных сред.

Приведем в качестве примера фазовые кривые ϕ_M и ϕ_3 (рис. 1.7) для двуслойного разреза, подстилаемого изолятором. Левыми асимптотами при $\lambda_1/h_1 \rightarrow 0$ будут $\phi_M = \pi/2$ для магнитного поля и $\phi_3 = 0$ для электрического. Правые асимптоты совпадают ($\phi_M = \phi_3 = 0$) при $\lambda_1/h_1 \rightarrow \infty$.

Трехслойные разрезы

Трехслойный разрез характеризуется параметрами: $\mu_1, \nu_1; \mu_2, \nu_2; \mu_3, \nu_3 = \infty$. Из них переменными величинами являются три параметра: относительные сопротивления второго слоя $\mu_2 = \rho_2/\rho_1$ и основания $\mu_3 = \rho_3/\rho_1$, которые могут принимать любые значения $\mu_2 \neq \mu_3$, и относительная мощность второго слоя $\nu_2 = h_2/h_1$. При этом $\nu_2 \neq 0$ и $\nu_2 \neq \infty$.

Напомним, что в электроразведке различают четыре типа трехслойных разрезов: *H*, *A*, *Q* и *K*, которые отличаются друг от друга отношением сопротивлений смежных слоев, т.е. значениями μ_2/μ_1

и μ_3/μ_2 . Для разрезов типа *H* сопротивление второго слоя больше сопротивления первого и основания, т.е. $\mu_2 < \mu_1$ и $\mu_2 < \mu_3$. В разрезе типа *A* сопротивление от слоя к слою по глубине разреза последовательно возрастает, т.е. $\mu_1 < \mu_2 < \mu_3$. В разрезе типа *Q* сопротивление от слоя к слою уменьшается: $\mu_1 > \mu_2 > \mu_3$. Наконец, в разрезе типа *K* сопротивление второго слоя больше сопротивления первого слоя и подстилающего основания, т.е. $\mu_2 > \mu_1$ и $\mu_2 > \mu_3$. Рассмотрим кривые $\tilde{\rho}_M$ и $\tilde{\rho}_3$, относящиеся к отдельным типам разрезов.

Разрез типа *H*. Кривые магнитного поля $\tilde{\rho}_M$, рассчитанные для разрезов типа *H* (при разносах $r/h_1 > 2$), состоят из следующих частей: левой горизонтальной асимптоты $\rho_M = 1$; слабо выраженного максимума в высокочастотной области; левой ниспадающей ветви, заканчивающейся характерным минимумом; восходящей правой ветви; максимума, расположенного в низкочастотной области; ниспадающей правой ветви кривой. На рис. 1.8 в качестве примера представлена палетка $\tilde{\rho}_M$, рассчитанная для типичного разреза типа *H*, имеющего изолирующее основание. Каждая кривая оцифрована значением разноса r/H , где $H = h_1 + h_2$.

Расчеты кривых для разрезов типа *H*, проведенные для серий значений параметров разреза μ_2 и ν_2 , показали, что угол наклона левой ветви кривой $\tilde{\rho}_M$ к оси λ_1/h_1 (рис. 1.8, а) зависит в основном от относительного сопротивления второго слоя μ_2 . Мощность второго слоя может влиять на наклон этой ветви только при малых значениях ν_2 ($\nu_2 < 1$), когда минимум кривой формируется в ее высокочастотной части. Величина разноса при этом влияет слабо. Все это позволяет использовать величину угла наклона левой ветви кривой для определения удельного сопротивления второго слоя разреза. Протяженность левой ветви кривой $\tilde{\rho}_M$ зависит от обоих параметров: μ_2 и ν_2 .

На значения координат точек минимума и максимума кривых влияют как параметры разреза, так и разнос. Особенно существенно зависит от разноса величина кажущегося сопротивления в максимуме кривой, т.е. $(\tilde{\rho}_M)_{\max}$ (см. рис. 1.12).

Переходя к кривым кажущегося сопротивления $\tilde{\rho}_3$, рассчитанного по электрической составляющей поля, отметим лишь самые характерные особенности этих кривых. Кривые $\tilde{\rho}_3$ (рис. 1.8, б) для разрезов типа *H* имеют, как и магнитные кривые, левую ниспадающую ветвь. Максимуму в низкочастотной части магнитных кривых соответствует переход кривой электрического поля в горизонтальную асимптоту.

Разрез типа *A*. На рис. 1.9, а дан пример палетки $\tilde{\rho}_M$ для разреза типа *A*, имеющего непроводящее основание. В этом случае каждая кривая, рассчитанная для фиксированного разноса, характеризуется узким минимумом в высокочастотной области и крутым подъемом левой восходящей ветви к максимуму, отражающему наличие высокоомного опорного горизонта зондирования. Второй слой разреза, имеющий повышенное сопротивление по сравнению с сопро-

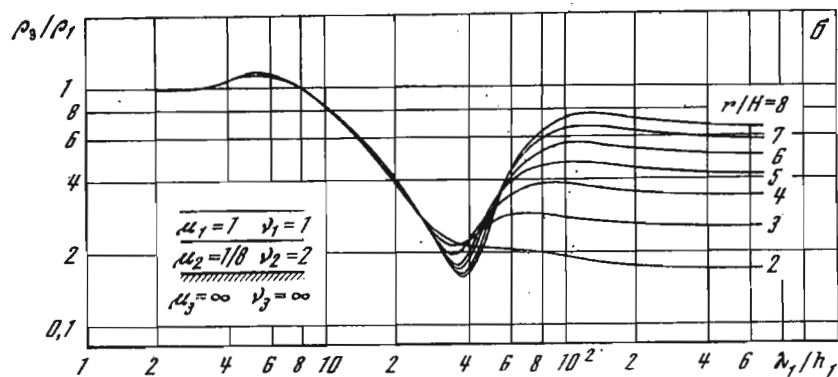
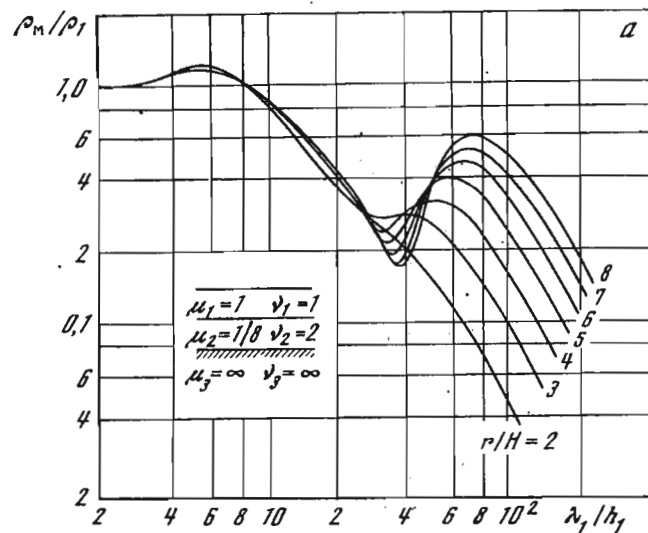


Рис. 1.8. Теоретические трехслойные кривые ЧЗ типа N для компонент поля H_z (а) и E_x (б)

тивлением верхнего слоя, отмечается на кривой $\bar{\rho}_M$ в виде слабо выраженного максимума кривой. Для того чтобы этот максимум был достаточно хорошо выражен на кривой, требуется большое значение относительной мощности ν_2 . При этом отношение ν_2/μ_2 должно быть больше единицы или (при больших μ_2) равно единице. Для больших ν_2 ($\nu_2 > 8$), а также с увеличением разноса максимум будет смещаться вправо, переходя на правую восходящую ветвь кривой.

Вследствие того, что для разрезов типа A значение суммарной проводимости $S = H/\rho_1$ невелико, линия S палеток типа A пересекает ось $\rho_M = 1$ в области сравнительно небольших значений λ_1/h_1 . Характерные точки кривой выявляются на небольшом интервале изменения λ_1/h_1 , особенно при зондировании на небольших разносах.

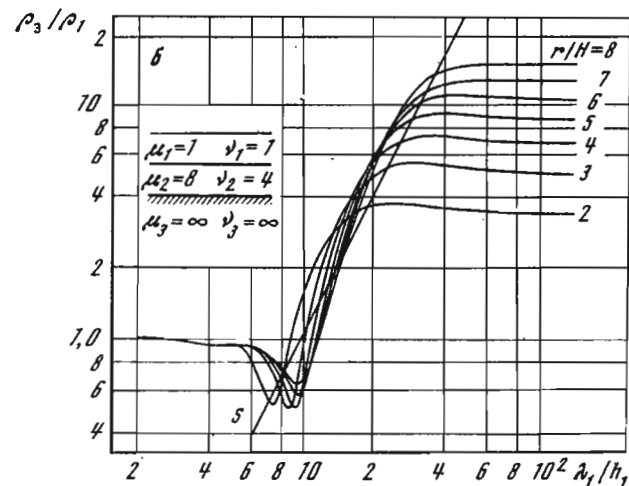
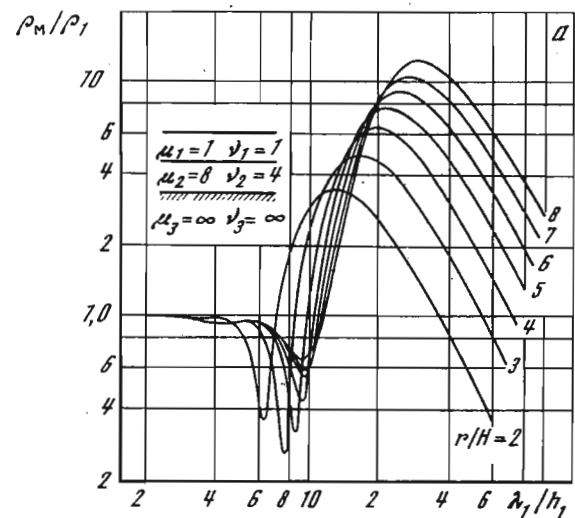


Рис. 1.9. Теоретические трехслойные кривые ЧЗ типа A по компонентам поля H_z (а) и E_x (б)

Для разреза типа A строение кривой кажущегося сопротивления по электрическому полю также резко отличается от кривой $\bar{\rho}_s$, рассчитанной для разреза типа N (рис. 1.9, б). В этом случае отсутствует левая ниспадающая ветвь и имеет место крутой подъем кривой перед переходом к горизонтальной асимптоте. Второй слой повышенного сопротивления μ_2 при $\nu_2/\mu_2 \gg 1$ и достаточно больших ν_2 формирует на кривой ρ_s максимум перед правой восходящей ветвью, который, так же как и для магнитных кривых, с уве-

личением мощности ν_2 и разноса смещается в область более низких частот.

Сравнивая кривые электрического и магнитного полей для разреза типа А, заметим, что кривые $\tilde{\rho}_3$ не имеют тех резких узких минимумов, которые характерны для соответствующих кривых магнитного поля $\tilde{\rho}_M$.

Трехслойный разрез с проводящим основанием

Мы рассмотрели трехслойные кривые $\tilde{\rho}_M$ и $\tilde{\rho}_3$ разрезов типа Н и А для случая основания-изолятора. Однако на практике весьма распространены разрезы, имеющие основание, для которых $\mu_3 \neq \infty$. На рис. 1.8 были даны кривые $\tilde{\rho}_M$ для серии двухслойных разрезов, подстилаемых основанием, сопротивление которого изменялось от $\mu_2 = 0$ до $\mu_2 = \infty$. Эти палетки позволили нам сделать выводы о влиянии сопротивления основания на величину и положение характерных точек двухслойных кривых. Аналогичные особенности в случае проводящего основания имеют кривые $\tilde{\rho}_M$ и $\tilde{\rho}_3$ для трехслойных разрезов типа Н (рис. 1.10). Дополнительно отметим, что влияние изменения сопротивления μ_2 на особые точки частотных кривых в сильной степени будет зависеть также от разноса, при котором проводится зондирование (рис. 1.10, б).

Для разрезов типа А всегда $1 < \mu_2 < \mu_3$. Поэтому изменение сопротивления основания не может происходить в тех же широких пределах, как для двухслойного разреза и разреза типа Н. Однако проводящее основание будет также существенно влиять на значение $\tilde{\rho}_M$ в максимуме кривой в ее стационарной части и в других особых точках.

Разрез типа К. Разрез типа К является простейшей моделью разреза с высокоомным слоем, конечной мощности. При этом следует различать два случая: высокоомный слой имеет настолько высокое сопротивление по сравнению с сопротивлением первого слоя, что его можно считать изолятором, т.е. положить $\mu_2 = \infty$, и высокоомный слой имеет высокое, но конечное сопротивление $\mu_2 \neq \infty$ (Дмитриев и др., 1975; Скугаревская и др., 1971; Тихонов и др., 1959). Остановимся сначала на случае, когда высокоомный слой — изолятор.

Как известно, слой-изолятор в разрезе является экраном для поля постоянного тока, что исключает возможность как исследования методами постоянного тока строения разреза под экраном, так и определения мощности самого экрана. Переменные электромагнитные поля вследствие индукционного эффекта проникают под экран и позволяют изучать как экран, так и подэкранную толщину. Однако магнитное и электрическое поля по-разному реагируют на наличие проводящего слоя в разрезе. Магнитное поле непосредственно связано с индукционным эффектом и поэтому легко проходит через слой-изолятор, давая информацию о строении подэкранной толщи. При этом имеется ограничение: наличие маломощного высокоомного слоя ($\nu_2 < 1/4$) не будет существенно сказываться на кривой магнитного поля. Для электрического поля индукционная часть будет весьма не-

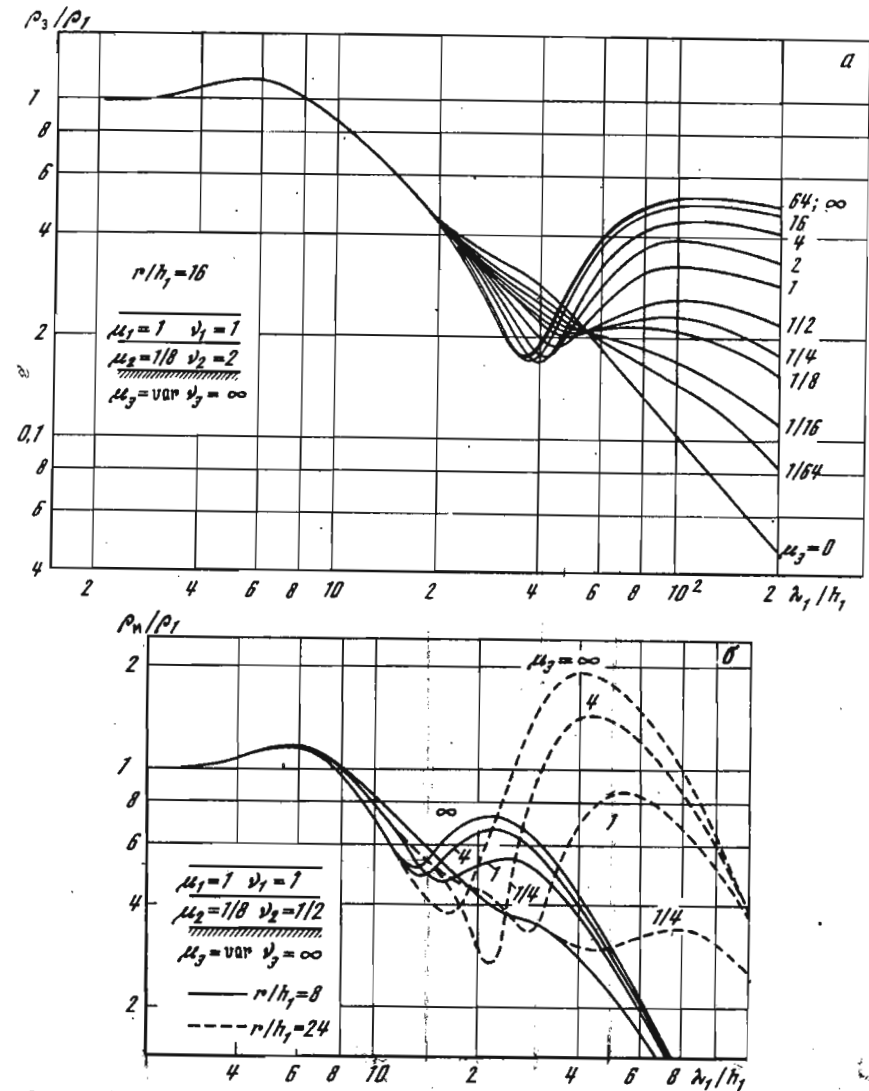


Рис. 1.10. Теоретические трехслойные кривые ЧЗ типа Н по компонентам поля E_x (а) и H_z (б) с проводящим основанием

значительной по сравнению с тем вкладом, который вносит в полное поле гальванический ток, возбуждающий поле в слое над изолятором. Поэтому строение подэкранной толщи разреза будет слабо сказываться на кривых кажущегося сопротивления и влиять только на значение фазы электрического поля. В то же время электрическое поле весьма чувствительно к наличию в разрезе даже тонкого высокоомного слоя.

Совместное использование особенностей магнитного и электрического полей в разрезах с изолирующей прослойкой позволяет прово-

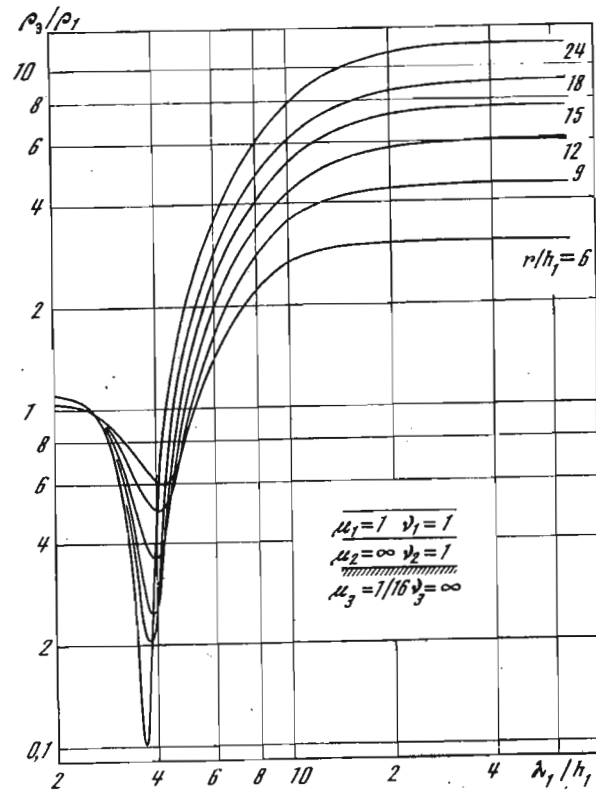


Рис. 1.11. Теоретические трехслойные кривые ЧЗ типа К по компоненте поля E_x

дять более детальную интерпретацию полевых материалов. При этом для определения строения подэкранной толщи используется магнитное поле, а для определения глубины залегания слоя-изолятора и его мощности — электрическое.

Рассмотрим кривые электрического поля $\tilde{\rho}_3$. Для выяснения особенностей строения этих кривых в разрезах с изолятором была рассчитана серия палеток $\tilde{\rho}_3$ для трехслойных и четырехслойных разрезов, у которых второй слой — изолятор. На рис. 1.11 представлена типичная палетка кривых $\tilde{\rho}_3$ трехслойного разреза типа К с значением $\mu_2 = \infty$. Характерной особенностью этих кривых является наличие глубокого узкого минимума в высокочастотной области и крутого подъема в развитой части кривой перед переходом на горизонтальную асимптоту. При этом значение $\tilde{\rho}_3$ на асимптоте с учетом разноса соответствует полю постоянного тока двухслойного разреза, подстилаемого изолятором ($\tilde{\rho}_3 = \tilde{\rho}_K / 2$). Форма минимума, а также значения $(\tilde{\rho}_3)_{\min}$ и $(\lambda_1/h_1)_{\min}$ для фиксированного разноса определяются как мощностью экрана, так и глубиной его погружения, т.е. величиной ν_2 , и слабо зависят от строения под-

экранной толщ. Большое влияние на значение $\tilde{\rho}_3$ в минимуме оказывает также величина разноса.

Слабое влияние параметров подэкранной толщи на строение минимума кривых $\tilde{\rho}_3$ иллюстрирует рис. 1.12, а, на котором представлены теоретические кривые $\tilde{\rho}_3$ для трехслойного и четырехслойных разрезов, различающихся строением под экраном. Разрезы имеют параметры:

$$\begin{aligned} \mu_1 = 1, \quad \nu_1 = 1; & \quad \mu_1 = 1, \quad \nu_1 = 1; \\ \mu_2 = \infty, \quad \nu_2 = 4; & \quad \mu_2 = \infty, \quad \nu_2 = 4; \\ \mu_3 = 1/16, \quad \nu_3 = \infty; & \quad \mu_3 = 1/16, 1/4, \quad \nu_3 = 1; \\ & \quad \mu_4 = \infty, \quad \nu_4 = \infty. \end{aligned}$$

Кривые рассчитаны для разносов $r/h_1 = 12, 18, 24, 30, 36$ и 48 . Трехслойные кривые проведены сплошными линиями, четырехслойные — штриховыми. Из графиков видно, что минимумы приведенных кривых практически совпадают при различных параметрах подэкранной толщи.

Существенное влияние на формирование минимума кривой ρ_3 имеет мощность изолирующего слоя ν_2 . Это влияние показывает график рис. 1.12, б, где представлены кривые для разрезов с непроводящим слоем различной мощности: $\nu_2 = 1/8; 1/4; 1/2; 1; 2; 4; \infty$. С увеличением мощности изолирующего слоя минимум становится менее "глубоким" и смещается в область более низких частот. Наибольшее значение в минимуме кривые $\tilde{\rho}_3$ имеют в случае бесконечной мощности изолирующего слоя (двухслойного разреза с непроводящим основанием). Наличие зависимости амплитуды электрической составляющей поля от мощности экрана позволяет по частотным кривым $\tilde{\rho}_3$ выделять в разрезе слой-изолятор и определять его мощность и глубину залегания.

Рассмотрим далее разрезы типа К, у которых второй слой имеет высокое, но конечное сопротивление ($\mu_2 \neq \infty$). В этом случае за счет протекания токов через этот слой влияние строения разреза под высокоомным слоем на кривую $\tilde{\rho}_3$ резко усиливается и открывается возможность изучения с помощью электрического поля строения разреза под высокоомным слоем. При этом изменяется вид кривой по сравнению со случаем слоя-изолятора (рис. 1.13). Именно характерный минимум в высокочастотной области исчезает и для достаточно больших разносов кривая $\tilde{\rho}_3$ приобретает другую характерную точку — хорошо выраженный максимум и перед выходом на горизонтальную асимптоту имеет ниспадающую правую ветвь, отражающую наличие проводящей зоны под высокоомным слоем. Поэтому электрическое поле в методе ЧЗ может использоваться, в частности, для выявления в фундаменте проводящих зон, расположенных под слоем высокого сопротивления.

На рис. 1.14 приведены кривые для разрезов с изменяющимся значением сопротивления высокоомного слоя ($\mu_2 = 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128, 512, 1024, \infty$). Видно, что характерность кривой возрастает с понижением сопротивления этого слоя. Для больших зна-

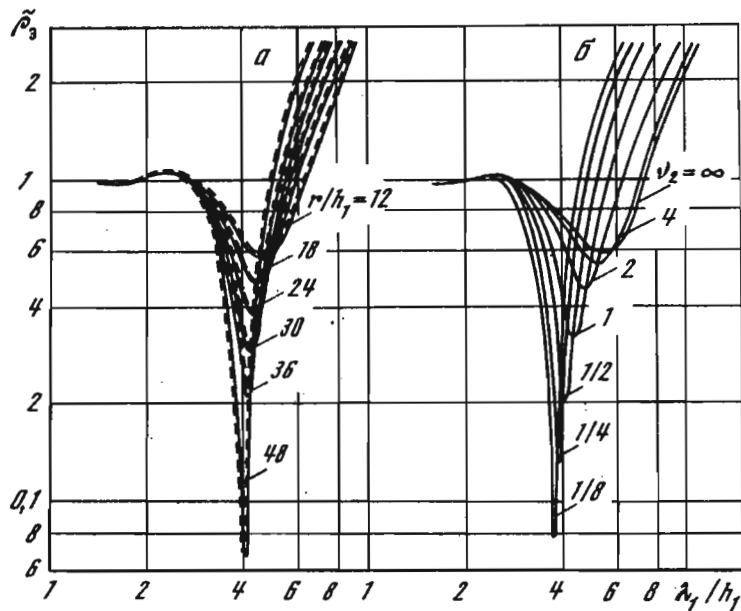


Рис. 1.12. Строение минимумов трехслойных и четырехслойных кривых ЧЗ для разрезов с экраном в зависимости от строения подэкранной толщи

чений μ_2 разрешающая способность кривых $\tilde{\rho}_3$ относительно определения μ_2 снижается и существует такое $\mu_2^* = \mu_2^*$, для которого высокоомный слой можно считать изолятором. В нашем примере слой сопротивления $\mu_2 > 10^3$ может быть принят за изолятор. Для разреза типа К значение μ_2^* будет зависеть от мощности высокоомного слоя и от величины разнosa, на котором проводится зондирование.

В условиях любого геоэлектрического разреза значительную роль для получения экспериментальной частотной кривой, характерной для данного разреза и вследствие этого наиболее удобной для проведения надежной интерпретации, играет величина разнosa, на котором проводится зондирование. Для высокоомных разрезов, и в частности для разреза типа К, форма кривой изменяется в зависимости от разнosa особенно существенно.

Рассмотрим влияние величины разнosa на примере разреза типа К, иллюстрируемом палеткой рис. 1.15. Разрез включает высокоомный слой $\mu_2 = 32$, имеющий мощность $\nu_2 = 4$, и подстилается хорошо проводящей толщей сопротивления $\mu_3 = 1/128$. На палетке собраны кривые для разносов $r/h_1 = 10$; 15; 20; 25; 30; 40. Штрихом дополнительно проведены кривые для соответствующего двухслойного разреза с подстилающим основанием $\mu_2 = 32$ для разносов $r/h_1 = 4$; 10; 20. Как показывают расчеты, при малых разносах кривые разреза типа К полностью совпадают с соответствующими кривыми двухслойного разреза. Естественно, что зондирования на таких разносах не позволяют выявить высокоомный слой и ис-

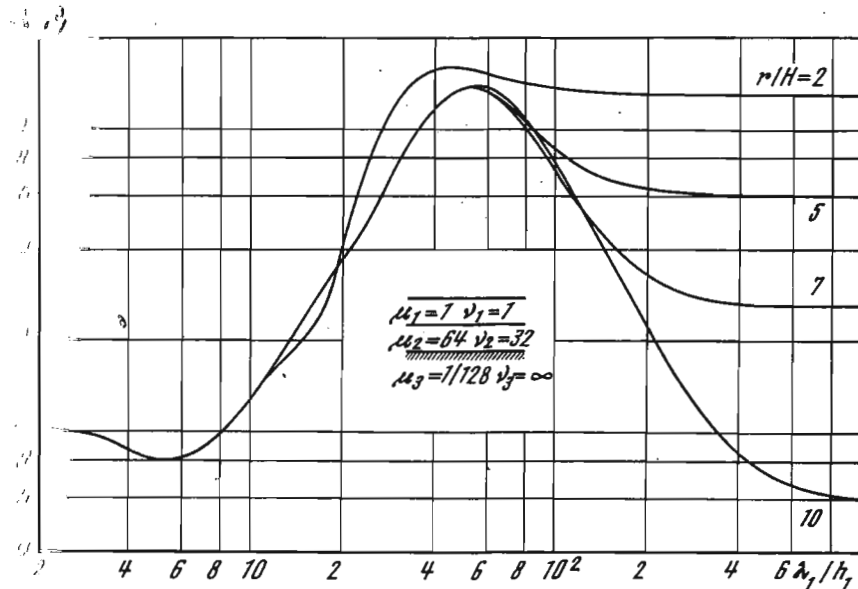


Рис. 1.13. Теоретические трехслойные кривые ЧЗ типа К для больших значений μ_2 и ν_2 .

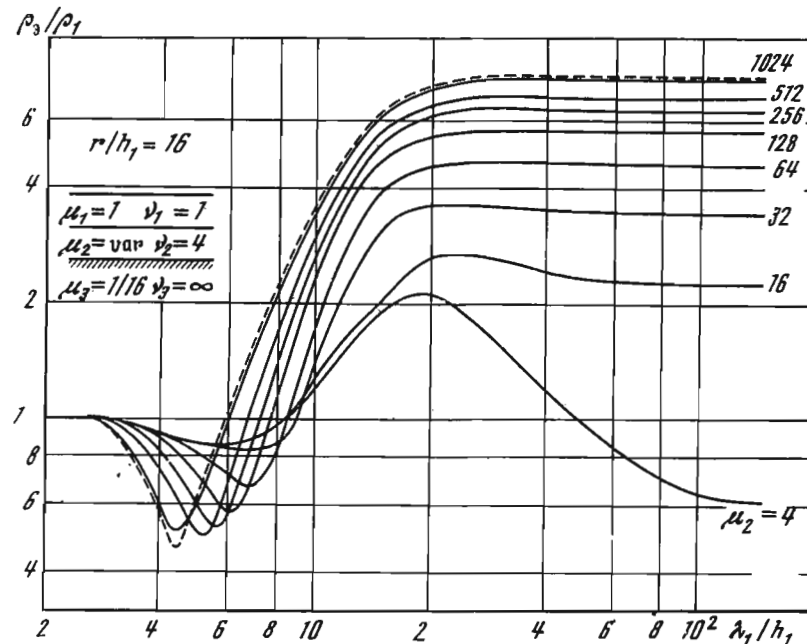


Рис. 1.14. Теоретические трехслойные кривые ЧЗ типа К при $\mu_2 = \text{var}$

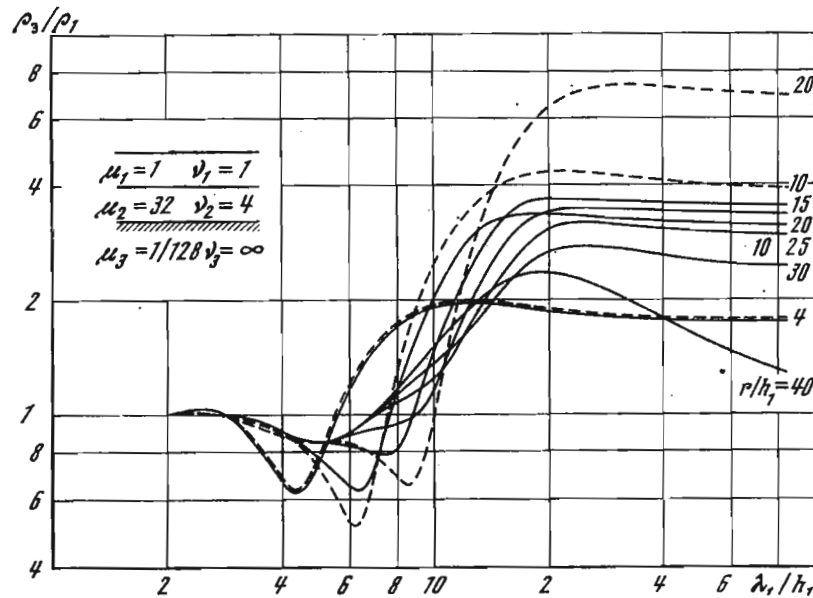


Рис. 1.15. Теоретические трехслойные кривые ЧЗ типа К при небольших ν_2

следовать проводящую зону под высокоомным слоем. С увеличением разноса совпадение кривых уже не будет иметь места. Поэтому на практике в условиях двухслойного разреза или разреза типа К следует проводить зондирования на двух значительно отличающихся друг от друга разносах для определения типа разреза.

Кроме того, существует серия кривых для средних разносов, также неблагоприятных для интерпретации. К ней относятся кривые, имеющие вид кривых двухслойного разреза и в низкочастотной области слабо изменяющиеся в зависимости от разноса (например, на рис. 1.22 стационарные части кривых $r/h_1 = 10$ и $r/h_1 = 25$ незначительно отличаются друг от друга). Наличие таких кривых связано с тем обстоятельством, что стационарное значение кажущегося сопротивления в разрезе типа К с ростом разноса сперва возрастает, а затем уменьшается. Наконец, при достаточно больших разносах кривые приобретают характерную форму, имея явно выраженный максимум и ниспадающую правую ветвь перед выходом на стационарное значение (на правую асимптоту). Эти кривые удобны для интерпретации и могут быть использованы для выделения высокоомного слоя в разрезе и исследования проводящей зоны под высокоомным слоем.

Четырехслойный разрез типа КН

В качестве примера палеток четырехслойного разреза приведем кривые кажущегося сопротивления для разреза типа КН. Большой объем выполненных расчетов позволяет сделать выводы, аналогичные сделанным ранее при изучении разреза типа К. Это естествен-

но, так как разрез типа КН является прежде всего разрезом, имеющим проводящую зону под слоем высокого сопротивления. Главнейшие особенности полей в разрезах типа КН определяются наличием высокоомного второго слоя. В качестве иллюстраций приведем на рис. 1.16, а-е палетки $\tilde{\rho}_M$ и $\tilde{\rho}_3$ для различных значений сопротивлений как высокоомного слоя, так и нижележащей проводящей зоны.

Таким образом, в гл. I мы кратко рассмотрели некоторые особенности электромагнитного поля в методе частотных зондирований

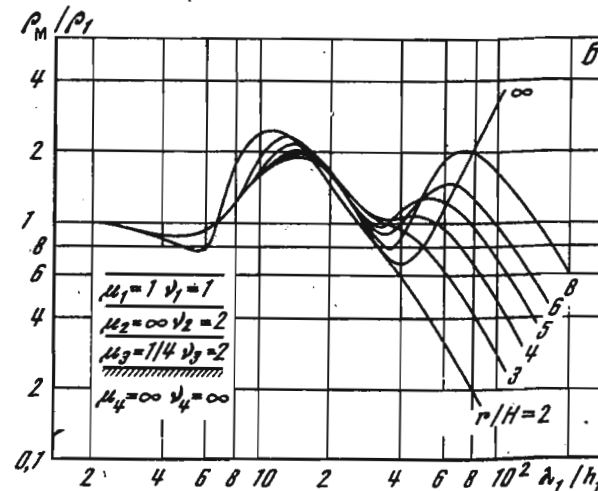
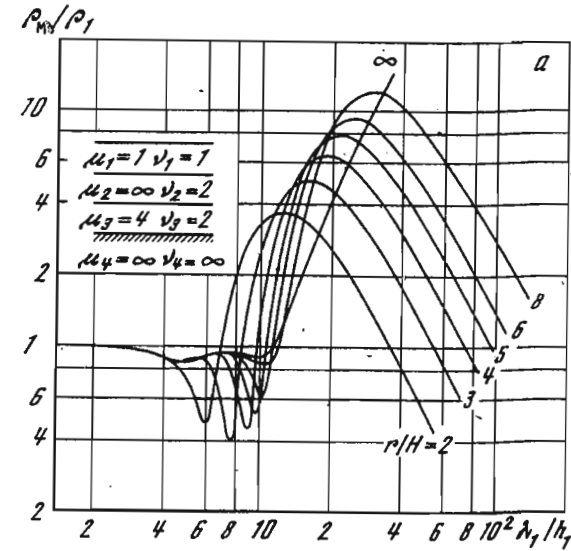


Рис. 1.16. Теоретические четырехслойные кривые ЧЗ типа КН

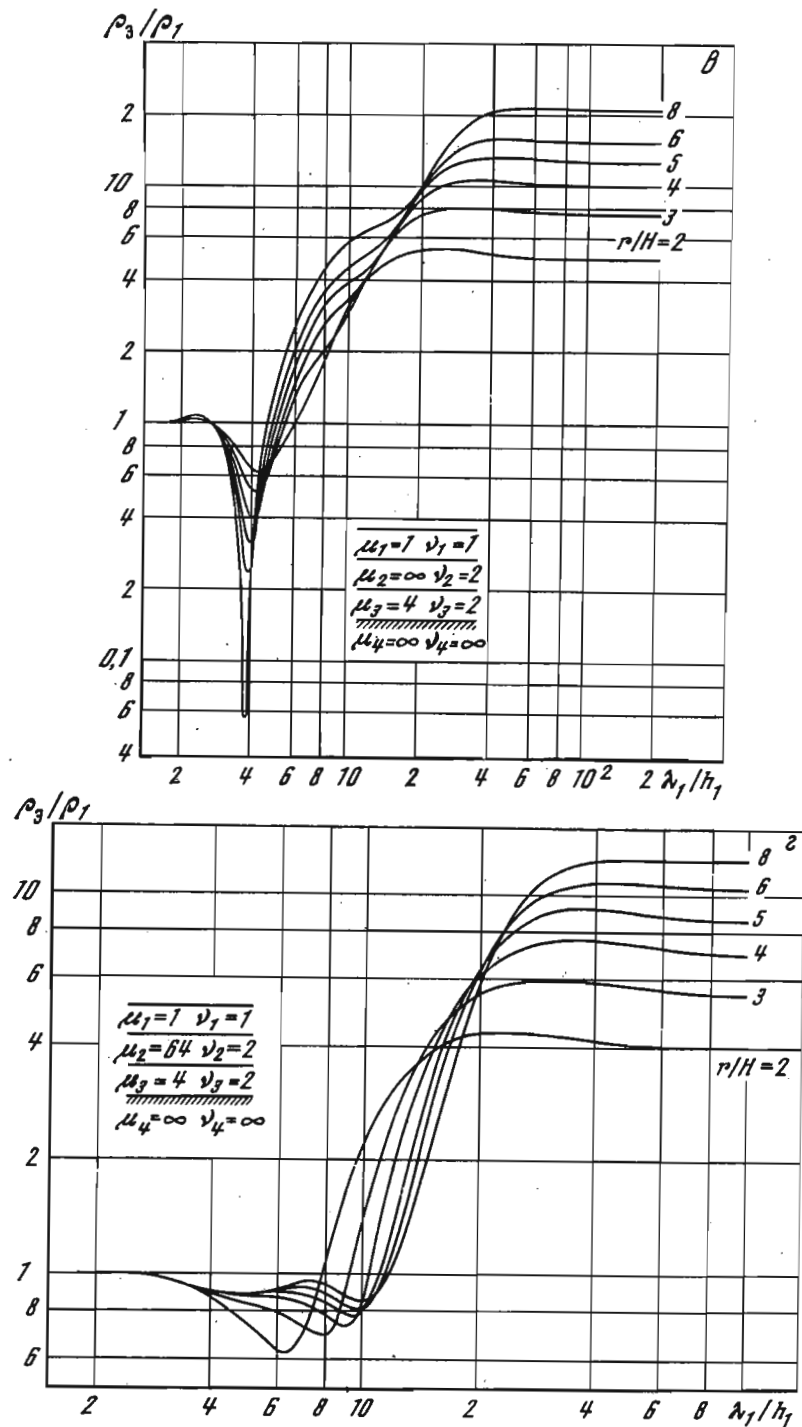


Рис. 1.16 (продолжение)

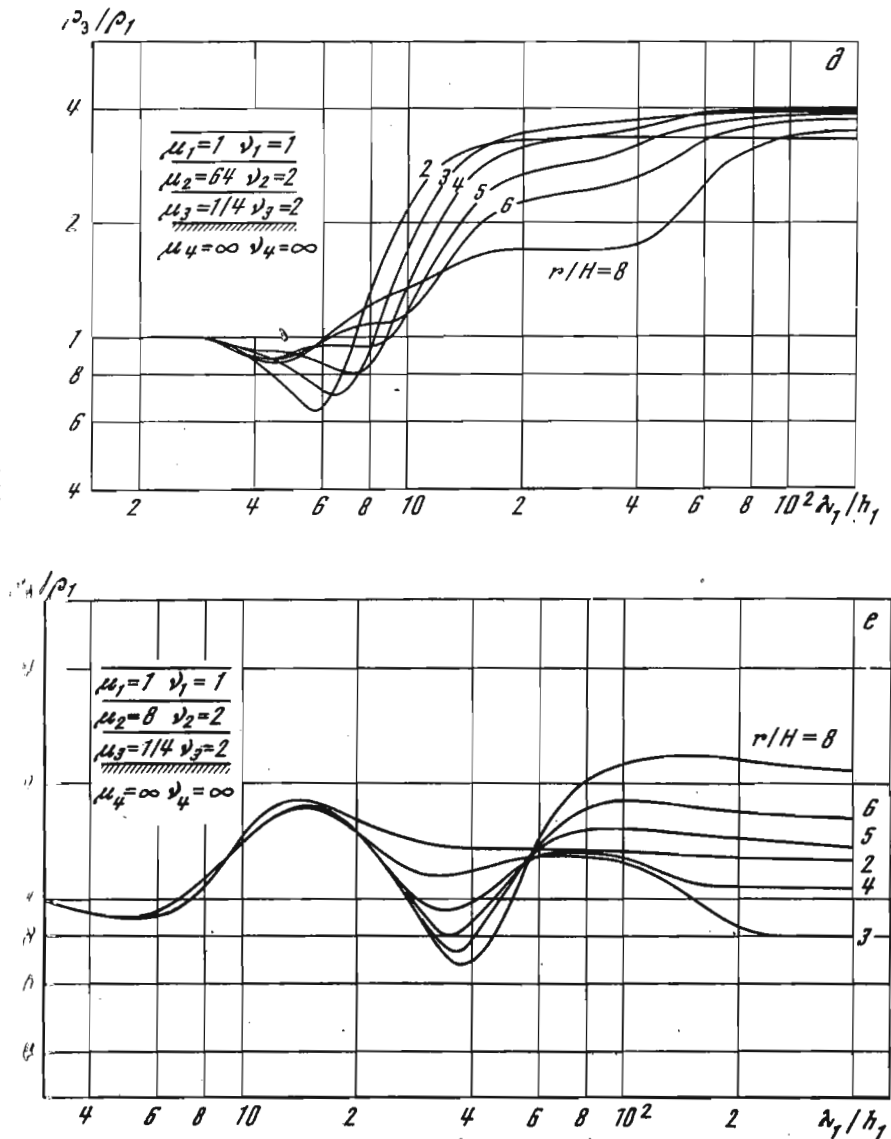


Рис. 1.16 (окончание)

над основными типами горизонтально-слоистых геоэлектрических разрезов. Уже качественный анализ соответствующих этим разрезам кривых кажущегося сопротивления, рассчитанных для электрического и магнитного полей, позволяет сделать вывод о принципиальной возможности использования метода ЧЗ для эффективного изучения строения геоэлектрических структур.

✓ ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ УСТАНОВКИ
ДЛЯ ЗОНДИРОВАНИЯ

Типы установок

В практике частотных зондирований в настоящее время используются четыре типа установок (рис. 2.1). В установках первого и второго типов (рис. 2.1, а, б) для возбуждения в земле электромагнитного поля используется заземленный электрический диполь; в установках третьего и четвертого типов — незаземленный вертикальный магнитный диполь (рис. 2.1, в, г). С помощью установок первого и третьего типов регистрируется горизонтальная электрическая компонента поля E_x , а с помощью установок второго и четвертого типов — вертикальная компонента магнитного поля H_z . Установки второго и третьего типов в силу принципа взаимности равноценны.

Электрический диполь (линия АВ), используемый для возбуждения поля при частотных зондированиях, представляет собой отрезок прямолинейного многожильного изолированного медного провода сечением от 2,5 до 25 мм², заземленный на концах с помощью электродов различной конструкции. Генератор переменного тока включается в разрыв провода, сделанный в его середине или на одном из концов. Такую же конструкцию имеет приемная линия, выполняемая обычно из более тонкого провода. Магнитные питающие и приемные диполи S выполняются в виде рамки, содержащей несколько витков изолированного провода, которые по соображениям удобства раскладываются на поверхности земли в виде квадрата. Генератор тока или измерительное устройство подключаются к концам рамки. Отметим, что диполи аналогичной конструкции используются также в методах становления поля и постоянного тока. При зондированиях питающая и приемные цепи располагаются на поверхности земли на некотором расстоянии r друг от друга, называемом разнесом.

В результате зондирования определяются следующие величины, зависящие от частоты: сила тока I в питающих диполях АВ или S в амперах, электродвижущая сила ΔV на концах приемного магнитного диполя S или линии MN в вольтах. Величина разноса r и длины диполей АВ и MN измеряются в метрах, а площади питающей и приемной рамок S — в квадратных метрах.

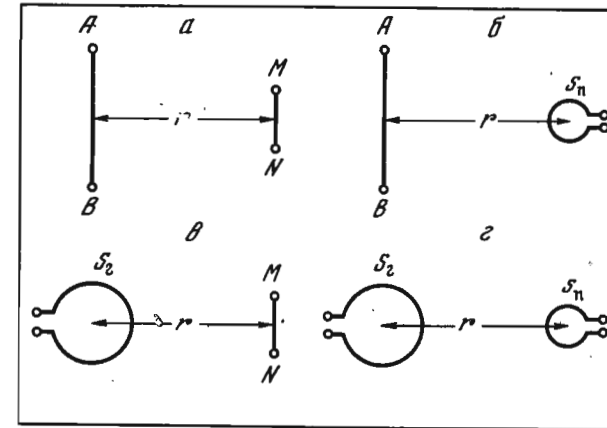


Рис. 2.1. Типы установок для ЧЗ

AB и MN — питающий и приемный диполи; S_Г и S_П — питающая и приемная петли; r — величина разноса

В процессе камеральной обработки полученных данных вычисляются значения кажущегося удельного сопротивления $\tilde{\rho}_\omega$ на переменном токе на каждой рабочей частоте по формуле

$$\rho_\omega = K \frac{\Delta V}{I}, \quad \rho_\omega = \rho_3 = \rho_M, \quad (2.1)$$

где

$$K = \frac{\pi r^3 \cdot 10^{-6}}{AB \cdot MN} \quad (2.2)$$

для установки первого типа. Для установок второго и третьего типов

$$K = \frac{2\pi r^4 \cdot 10^{-6}}{3C \cdot D} \quad (2.3)$$

здесь C = AB и D = q — для установки второго типа и C = Q, а D = MN — для установки третьего. Для установки четвертого типа

$$K = \frac{2\pi r^5 \cdot 10^{-6}}{9Q \cdot q} \quad (2.4)$$

В (2.3) и (2.4) величина Q = S_Г N, где S_Г — площадь одного витка питающего магнитного диполя в квадратных метрах, а N — число витков; q = S_П n, где S_П — площадь одного витка измерительной рамки, а n — число ее витков.

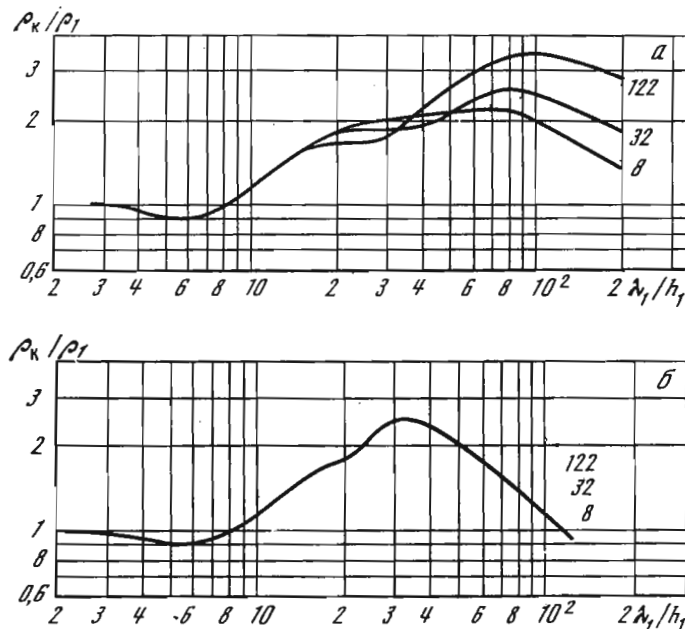


Рис. 2.2. Теоретические кривые ЧЗ типа КНК по составляющим поля E_x (а) и H_z (б)

Вычисленные значения $\rho_{3;M}$ наносятся на билогарифмические бланки с модулем 6,25 или 10 см. По оси абсцисс откладываются величины $1/\sqrt{f}$, где f — частота тока в герцах, а по оси ординат — значения ρ_3 и ρ_M в ом-метрах.

Возбуждение поля незаземленным магнитным диполем чаще всего производят при проведении исследований, связанных с поиском хорошо проводящих объектов, а также в тех случаях, когда бывает трудно обеспечить требуемые значения величины переходного сопротивления заземления линии АВ (порядка 200 Ом и менее) (Светов, 1973; Светов и др., 1976а,б). Для этого генераторная установка НЧЗ подключается к рамке \mathcal{S} через резистор величиной порядка 15–20 Ом, рассчитанный на мощность 25–50 Вт. Генераторная установка станции СЧЗ подключается непосредственно к рамке в тех случаях, когда ее омическое сопротивление оказывается более 5–7 Ом.

Из (2.1) – (2.4) следует, что величины измеряемых при зондированиях сигналов существенно зависят от типа установки и особенно от величины разности r между ними. Поэтому при фиксированном разnose r наибольшую чувствительность имеет установка первого типа (АВ–МN), а наименьшую — четвертого (S–s). Заметим, что для обеспечения в пункте приема равных по величине сигналов при измерениях установками второго и третьего типов необходимо, чтобы выполнялось следующее условие:

$$AB/MN = Q/q.$$

Разрешающая способность установок также различна. При зондированиях разрезов, не содержащих промежуточных высокоомных пластов, разрешающая способность установок первых трех типов практически одинакова. При зондированиях более сложных структур, например К, КН или КНК, в тех случаях, когда промежуточные пласты имеют конечную проводимость, несколько большей разрешающей способностью обладает установка АВ–МN (рис. 2.2).

На рис. 2.2, а в качестве примера приведены кривые E_x типа КНК, оцифрованные относительными значениями удельного сопротивления четвертого слоя ρ_4/ρ_1 , равными 8, 32 и 122. На рис. 2.2, б приведены кривые H_z , рассчитанные для тех же параметров разреза. Как видно из рис. 2.2, б, с помощью кривых H_z , в отличие от кривых E_x , определение удельного сопротивления и мощности четвертого слоя разреза в этом случае не представляется возможным.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИАПАЗОНА РАБОЧИХ ЧАСТОТ

Диапазон частот, требующийся для записи полной кривой частотного зондирования, определяется путем анализа теоретических кривых. Он показывает, что на частотах $f \geq f_B$, соответствующих значениям

$$\lambda_1/h_1 \leq 2, \quad (2.5)$$

где $\lambda_1 = \sqrt{\frac{10^7 \rho_1}{f}}$ — длина волны в верхнем слое в метрах, левые ветви экспериментальных кривых независимо от сложности строения разреза выходят на горизонтальную асимптоту, на которой значение удельного кажущегося сопротивления равно удельному сопротивлению верхнего слоя ρ_1 .

Из (2.5) имеем

$$f_B \geq 2,5 \cdot 10^6 \rho_1 / h_1^2 \quad \text{Гц.} \quad (2.6)$$

С помощью формулы (2.6) определяется верхняя граничная частота диапазона, необходимого для записи полной кривой частотного зондирования.

Для определения нижней частотной границы этого диапазона f_H можно использовать, например, одну из особенностей строения правой ветви кривых частотного зондирования по составляющей поля H_z , заключающуюся в том, что независимо от сложности строения разреза, подстилаемого изолятором, правая асимптота кривой H_z пересекает прямую $\rho_{\omega} = \rho_1$ в точке, имеющей абсциссу $1/\sqrt{f_H}$, зависящую только от величин ρ_1 и r . При этом

$$f_H \leq 8 \cdot 10^5 \rho_1 / r^2. \quad (2.7)$$

Таблица 1

Значения ширины диапазона частот (в Гц), необходимых для записи полной кривой частотного зондирования при $r/h_1 = 4$

Мощность до опорного горизонта, м	Значения среднего продольного сопротивления, Ом·м			
	1	10	100	1000
1	10^6-10^4	10^7-10^5	$10^8-5 \cdot 10^6$	$10^9-5 \cdot 10^7$
10	$10^4-5 \cdot 10^2$	$10^5-5 \cdot 10^3$	$10^6-5 \cdot 10^4$	$10^7-5 \cdot 10^5$
100	10^2-5	10^3-50	$10^4-5 \cdot 10^2$	$10^5-5 \cdot 10^3$
1000	$5-5 \cdot 10^{-2}$	$20-5 \cdot 10^{-1}$	10^2-5	10^3-50

Заметим, что формула (2.7) может быть использована также и для контроля за величиной разноса r , определяемого прямыми измерениями.

Из (2.6) и (2.7) имеем

$$f_B/f_H = 3,1 (r/h_1)^2. \quad (2.8)$$

Для многослойных разрезов возможно также проводить оценку диапазона частот зондирования по (2.6) и (2.7) в зависимости от среднего продольного сопротивления ρ_l .

Формула (2.8) является приближенной. Однако, несмотря на это, она дает возможность не только сделать оценку диапазона частот, требующегося для записи полной кривой частотного зондирования в конкретных геологических условиях, но и установить характер этой зависимости от величины r/h_1 .

В табл. 1 приведены рассчитанные по (2.6) и (2.7) при $r/h_1 = 4$ и округленные значения диапазона частот в герцах, необходимые для записи полной кривой ЧЗ для случаев, когда мощность надпорной толщи равна 1, 10, 100, 1000 м, а среднее продольное сопротивление разреза ρ_l равно 1, 10, 100, 1000 Ом·м. Из таблицы видно, что диапазон частот, требующийся для частотных зондирований реальных геоэлектрических структур, оказывается чрезвычайно широким, вследствие чего проведение исследований во всем диапазоне частот с помощью одного комплекта аппаратуры не может быть обеспечено. Именно это обстоятельство обусловило необходимость создания различных модификаций аппаратуры для частотных зондирований, которые предназначаются обычно для решения ограниченного круга геологических задач. Однако, несмотря на это, на практике кривые частотного зондирования нередко записываются не полностью.

ВЫБОР ВЕЛИЧИНЫ РАЗНОСА

Выбор оптимальной величины разноса r при частотных зондированиях имеет большое практическое значение. Во-первых, с уменьшением разноса возрастает детальность исследования, а во-вторых, значительно увеличивается отношение сигнал-помеха, поскольку, как это следует из (2.1), даже небольшие изменения величины r приводят к резкому изменению амплитуд измеряемых сигналов. Однако при уменьшении разноса сверх определенного предела, равного в среднем 2,5 - 3 глубинам исследования, кривые частотного зондирования становятся значительно менее "характерными", что затрудняет их интерпретацию. Под термином "характерность" условимся понимать совокупность основных признаков, определяющих строение данной кривой (количество экстремумов, значения углов наклона ветвей, амплитуд в максимуме и минимуме кривых и др.).

Рассмотрим, например, двуслойные теоретические кривые типа $\mu_2 = \infty$ по составляющей поля H_z , изображенные на рис. 2.3. Характерной особенностью строения кривых этого типа являются значения координат максимума и минимума. На первый взгляд может показаться, что характерность кривых ЧЗ с увеличением разноса возрастает. Действительно, с ростом r увеличивается амплитуда правой ветви кривой, что, казалось бы, дает возможность измерения этой величины с большей точностью. Однако с увеличением разноса величины измеряемых сигналов резко уменьшаются, что приводит к снижению точности измерения вследствие возрастания искажающего влияния помех.

Далее, нетрудно заметить, что начиная со значений $r/h_1 < 3$ кривые H_z постепенно утрачивают свои характерные признаки и при $r/h_1 < 2$ их строение практически перестает зависеть от величины разноса. По сравнению с кривыми H_z кривые E_x имеют большую разрешающую способность, но и они при $r/h_1 < 2$ становятся мало-характерными. Поэтому можно считать, что в среднем оптимальная величина разноса лежит в пределах от 3 до 5 глубин исследования.

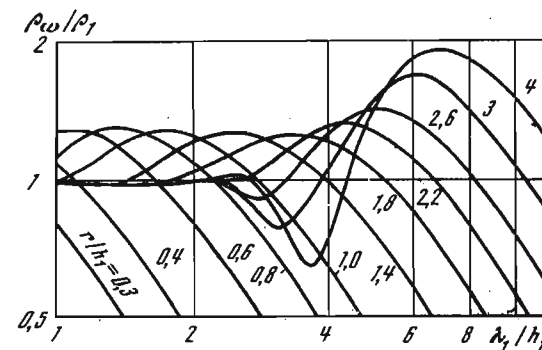


Рис. 2.3. Двуслойные теоретические кривые ЧЗ типа $\mu_2 = \infty$ по компоненте поля H_z

Возможны случаи, когда кривые, соответствующие различным разрезам, совпадают по форме. В частности, это имеет место для кривых типа *K*, которые при малых разносах по виду соответствуют двуслойным кривым. В этом случае необходимо проведение дополнительного зондирования с большим разносом (Дмитриев и др., 1975).

Необходимо, однако, отметить, что вопрос об оптимальных разносах должен решаться в каждом конкретном случае, поскольку он зависит от множества различных факторов, например: особенностей строения кривых различных типов, действия принципа эквивалентности, разрешающей способности установок и др.

ВЫБОР ДЛИНЫ ЛИНИЙ *AB*, *MN* И ПЛОЩАДЕЙ РАМОК *S*

Выбор оптимальных величин параметров установок для зондирования — длин питающей и приемной линий, площадей рамок и силы тока в питающей цепи — дает возможность дополнительного превышения сигнала над помехой и, следовательно, увеличения точности измерений.

Сила тока в линии *AB* зависит не только от мощности генераторной установки и величины переходного сопротивления заземления линии, но также и от ее длины, определяющей добавочную величину индуктивного сопротивления на высоких частотах.

При частотных зондированиях длина линии *AB*, как правило, не должна превышать четверти величины разноса. Невыполнение этого условия приводит к нарушению дипольности установки *AB-MN*, вследствие чего в полученные результаты необходимо вводить поправки, используя номограммы Л.Л. Ваньяна, приведенные на рис. 2.4. На рисунках по оси абсцисс отложены значения r/AB , а по оси ординат — значения $\eta_1 = E_x/E_{x \text{ дип}}$ и $\eta_2 = H_z/H_{z \text{ дип}}$. Кривые оцифрованы значениями величин углов θ между линией *AB* и направлением на центры приемного диполя *MN* или рамки *S*. Из приведенных номограмм следует, что поправки на величины измеряемых сигналов не превышают 2%, когда $r/AB > 4$. Поэтому на практике целесообразно ограничиться значениями $AB \approx r/4$.

Мощность генераторной установки станции НЧЗ равна около 200 Вт, а сила тока в линии *AB* обычно не превышает 1,5 А. Следовательно, величина момента питающего диполя при непрерывных зондированиях в среднем будет равна 500 А·м. Мощность генераторной установки станции для глубинных зондированиях ЭРС-67 равна около 30 кВт, а сила тока в линии *AB*, имеющей длину 2–4 км, достигает 40–50 А. В этом случае момент питающего диполя в среднем будет равен 10^5 А·м.

Очевидно, что увеличение длины приемной линии *MN* или площади приемной рамки *s* не дает выигрыша в помехоустойчивости, так как приводит к одновременному росту как полезного сигнала, так и помехи. Поэтому при непрерывных частотных зондированиях длина

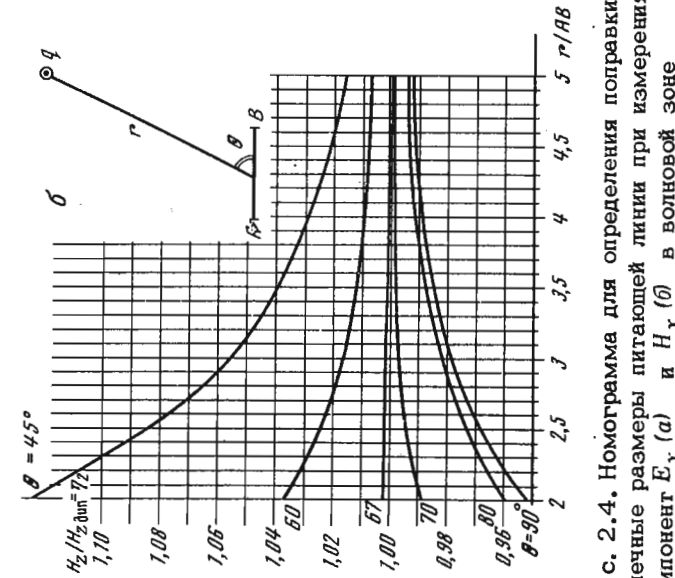
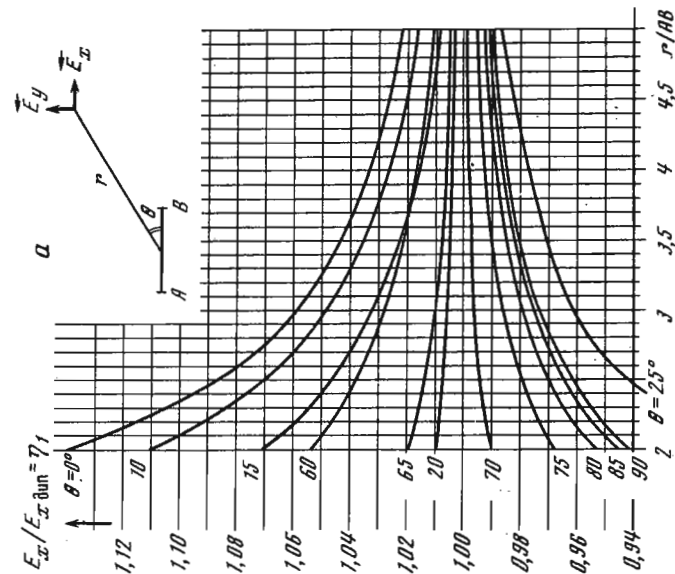


Рис. 2.4. Номограмма для определения поправки на конечные размеры питающей линии при измерениях компонент E_x (*a*) и H_z (*b*) в волновой зоне



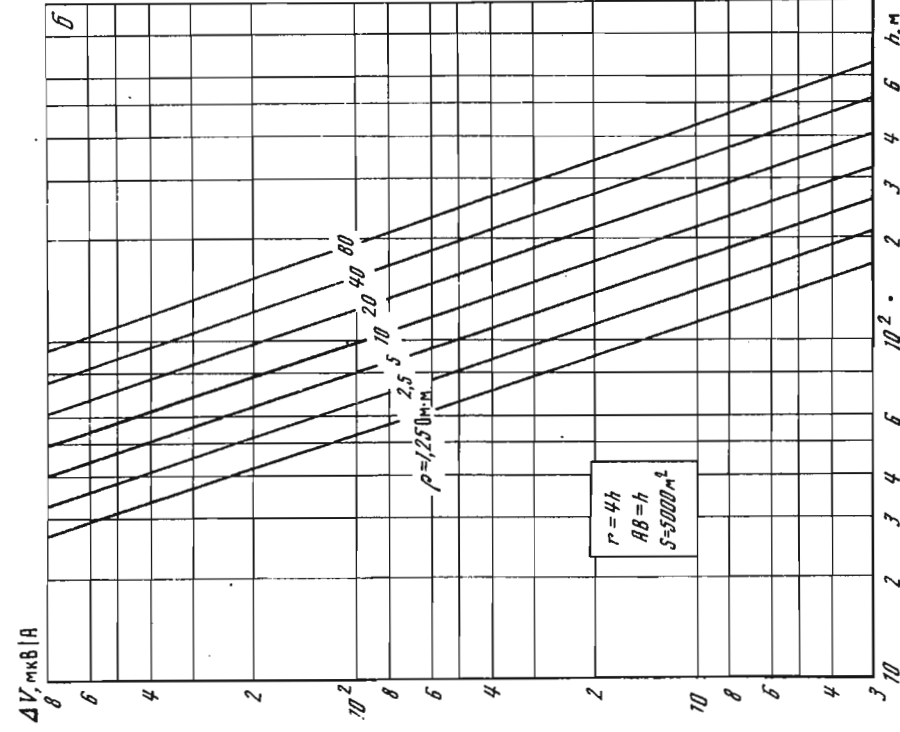
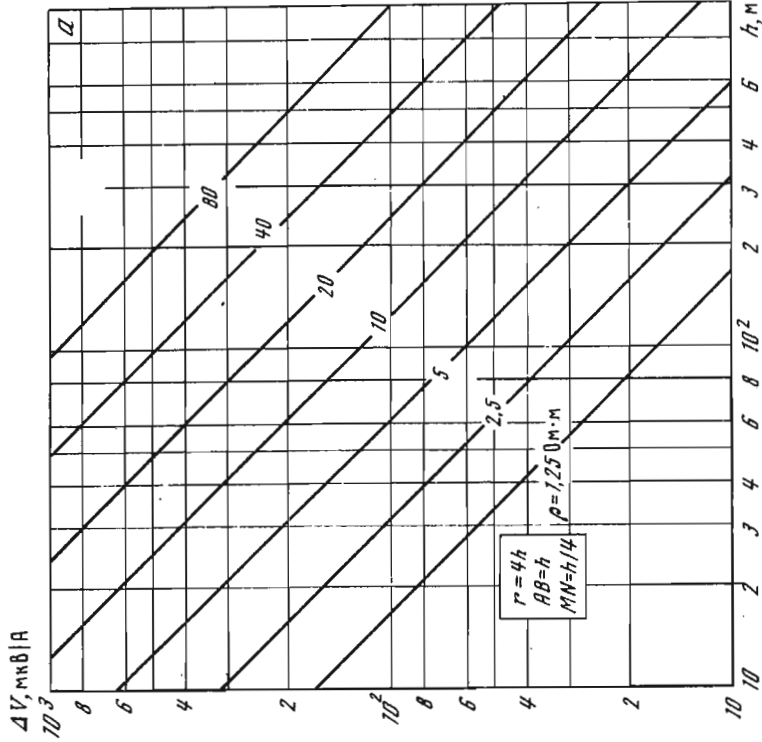


Рис. 2.5. Номограммы для определения амплитуды измеряемых сигналов при ЧЗ по компонентам поля E_x (а) и H_z (б)

ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПИТАЮЩЕЙ И ПРИЕМНОЙ ЛИНИЙ

При проведении исследований методом частотных зондирований входное сопротивление электрического или магнитного диполя нельзя принимать чисто активным и равным сумме омического сопротивления провода и переходного сопротивления электродов-заземлителей, поскольку в диапазоне звуковых частот, особенно используемом при непрерывных зондированиях, индуктивная составляющая входного сопротивления диполей на частотах выше единиц килогерц, а при длине диполя порядка нескольких километров - выше сотен герц уже имеет значительную величину. Изменение входного сопротивления диполей на высоких частотах будет приводить к рассогласованию выхода генератора переменного тока с нагрузкой (линией III). Поэтому возникает необходимость в определении оптимальных параметров линии AB и рамки s .

Эквивалентная схема электрического и магнитного диполей на достаточно низких частотах может быть представлена в виде двух последовательно включенных элементов: активного сопротивления R и индуктивности. Для электрического диполя величина R равна сумме активного сопротивления провода и переходного сопротивления электродов-заземлителей, для магнитного - величине активного сопротивления провода.

длины MN выбирается равной 10-20 м, а при глубинных - 50-100 м. С другой стороны, использование диполей MN малой длины и пистоль с малого размера нежелательно, поскольку в этом случае будет резко возрастать влияние локальных неоднородностей, всегда присутствующих в верхних слоях разреза, на величины измеряемых при зондированиях сигналов, и, следовательно, на значения ρ_{ω} , определяемые при интерпретации. Кроме того, при выборе длин линий необходимо учитывать их частотные характеристики.

На рис. 2.5 приведены номограммы для определения амплитуд сигналов, соответственно измеряемых при зондированиях по компонентам поля E_x и H_z . Для определенности длина линии AB выбрана равной $r/4$, линии $MN = AB \lambda/4$, а эквивалентная площадь приемной рамки - 5000 м^2 . На номограммах по оси абсцисс отложены значения мощности осадочной толщи в метрах, а по оси ординат - величины измеряемых сигналов в микровольтах. Прямые оцифрованы значениями среднего продольного сопротивления разреза в ом-метрах.

Отметим также, что площадь приемной рамки s даже при отсутствии помех можно увеличивать только до определенного предела, значение которого зависит от величины входного сопротивления и мощности усилителя приемной установки. Более подробно этот вопрос будет рассмотрен ниже.

Величина индуктивности (в генри) линейного проводника длиной l см и диаметром d см, находящегося в воздухе, может быть определена по следующей приближенной формуле:

$$L = 2 \cdot 10^{-9} \left(\ln \frac{4l}{d} - 0,75 \right) l, \quad (2.9)$$

а индуктивность квадратного витка — по формуле

$$L = 8 \cdot 10^{-9} \left(\ln \frac{2l}{d} + \frac{d}{2l} \right) l, \quad (2.10)$$

где l — длина стороны квадрата в сантиметрах, а d — диаметр провода в сантиметрах.

Как показывают расчеты, влияние проводимостей земли (Фок, Бурсиан, 1926), на поверхности которой располагаются диполи, на величины их индуктивного сопротивления по сравнению с (2.9) и (2.10) незначительно и при приближенных расчетах им можно пренебречь (Зернятю, Четаев, 1959; Иванов и др., 19646). Поэтому входное сопротивление электрических и магнитных диполей на низких и средних частотах звукового диапазона с достаточной для практики точностью может быть определено по известной формуле

$$Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}, \quad (2.11)$$

в которой значение L подставляется из (2.9) или (2.10), а величина R — переходное сопротивление заземления линии AB или омическое сопротивление провода магнитного диполя.

Из (2.9) и (2.10) следует, что индуктивное сопротивление линии AB , имеющей длину, например, 500 м, на частоте 10 кГц равно около 76,3 Ом, в то время как величина переходного сопротивления заземления обычно равна 10–20 Ом. У магнитного диполя, имеющего форму квадрата со стороной $l = 20$ м и число витков, равное трем, величина индуктивного сопротивления будет равна ~87,5 Ом, тогда как омическое сопротивление провода — всего несколькими десятками ома.

Между тем максимальная величина нагрузки, на которую рассчитана генераторная установка станции НЧЗ, равна 200 Ом, станции СЧЗ—50–60 Ом, а входное сопротивление приемных установок равно 10 кОм. Следовательно, величина индуктивного сопротивления линии AB или рамки S на верхней границе частотного диапазона не должна превышать величины 30–40 Ом, а величина индуктивного сопротивления измерительной рамки — 200–300 Ом.

При зондированиях на дискретных частотах градуировка приемно-усилительного тракта производится на каждой рабочей частоте, и поэтому учет импедансов приемных цепей может проводиться.

На рис. 2.6 приведена в качестве примера экспериментальная кривая зависимости силы тока в заземленном электрическом диполе

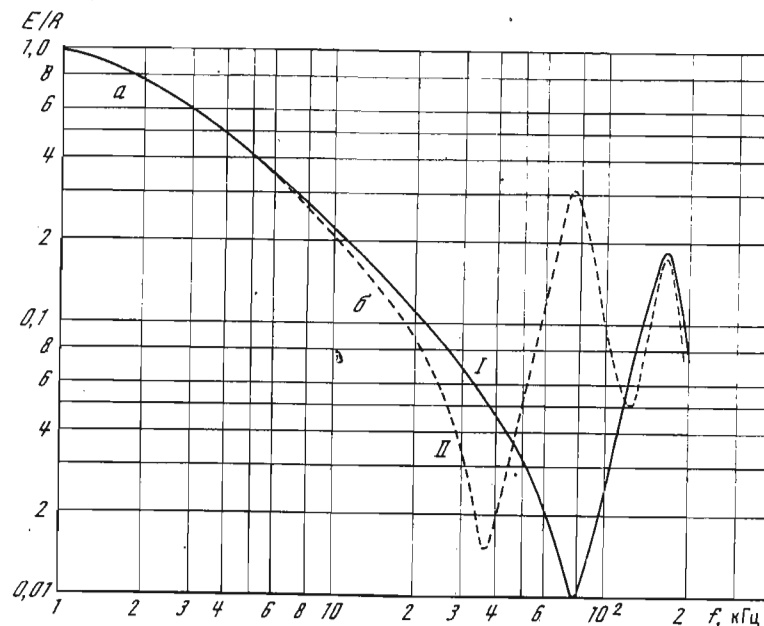


Рис. 2.6. Экспериментальная кривая зависимости силы тока в заземленном электрическом диполе от частоты

длиной 640 м, снятая в диапазоне частот от 100 Гц до 200 кГц. Кривая I соответствует включению генератора переменного тока в разрыв, сделанный в середине провода, кривая II — включению генератора на конце диполя. На графике по оси абсцисс отложены в логарифмическом масштабе значения частоты тока в килогерцах, а по оси ординат в том же масштабе — относительные значения силы тока в диполе. За единицу силы тока $I = E/R$ принято его значение на очень низкой частоте.

Как видно из рис. 2.6, по мере повышения частоты тока от 100 Гц до 7–8 кГц сила тока в диполе убывает сначала в соответствии с (2.11). В дальнейшем по мере повышения частоты частотная характеристика заземленного электрического диполя приближается к частотной характеристике, симметричной полуволновой или несимметричной четвертьволновой антенны. Поскольку, однако, эта антенна лежит на поверхности земли, то ее собственная резонансная частота f_p по сравнению с таковой в воздухе f_0 смещается в сторону более низких частот на величину, зависящую от проводимости и диэлектрической проницаемости подстилающих горных пород (в рассматриваемом случае — почти в 2 раза). Поэтому при частотных зондированиях длина питающей линии должна быть ограничена значениями, при которых на высшей частоте рабочего диапазона еще не проявляются ее резонансные свойства (участок кривой *a–б* на рис. 2.6).

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО ЗАКОНА И СКОРОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ ЧАСТОТЫ ПИТАЮЩЕГО ТОКА ВО ВРЕМЕНИ ПРИ НЕПРЕРЫВНЫХ ЧАСТОТНЫХ ЗОНДИРОВАНИЯХ

В методе непрерывных частотных зондирований в отличие от зондирований на дискретных частотах электромагнитное поле в Земле возбуждается переменным током, частота которого непрерывно изменяется во времени в заданном диапазоне частот по выбранному закону (Иванов, 1975). Это означает, что форма кривой тока в линии АВ при непрерывных зондированиях будет отличаться от синусоидальной, причем эти отличия будут возрастать по мере увеличения скорости изменения частоты тока в линии АВ, вследствие чего могут возникнуть ошибки при регистрации кривых.

Изменение частоты тока в линии АВ во времени может производиться по различным законам, например линейному:

$$f = f_0(1 + at)$$

или показательному:

$$f = f_0 e^{\gamma t}$$

Здесь f_0 — нижняя граница частотного диапазона, a и γ — постоянные параметры, характеризующие скорость изменения частоты тока во времени (девиацию частоты).

Из теории частотных зондирований следует, что девиацию частоты тока наиболее целесообразно осуществлять по показательному закону, при котором равномерному течению времени будет соответствовать изменение частоты тока в линии АВ в логарифмическом масштабе, принятом при построении теоретических и экспериментальных кривых зондирований, поскольку он обеспечивает в различных участках частотного диапазона одинаковую детальность разведки по глубине (Иванов, Никитина, 1968). Кроме того, изменение частоты питающего тока по показательному закону оказывается значительно более выгодным также и с точки зрения уменьшения величины нелинейных искажений по сравнению с линейным законом, что дает возможность увеличить скорость изменения частоты без существенного увеличения нелинейных искажений более чем в 30 раз по сравнению со скоростью, необходимой для обеспечения той же величины искажений при девиации по линейному закону.

Время девиации частоты тока в диапазоне частот от f_0 до верхней граничной частоты F соответственно для линейного и показательного законов определяется по формулам

$$T_{\text{лин}} = \frac{F - f_0}{af_0}, \quad T_{\text{пок}} = \frac{\ln F - \ln f_0}{\gamma}$$

Число периодов (колебаний), т.е. количество дискретных частот зондирования, за время девиации определяется по формулам

$$N_{\text{лин}} = \frac{F - f_0}{a} \left(1 - \frac{aT}{2}\right), \quad N_{\text{пок}} = \frac{F - f_0}{\gamma}$$

В частности, в диапазоне частот, используемом в методе НЧЗ, $f_{\text{лин}} = 10^6$, а $N_{\text{пок}} = 4 \cdot 10^5$ периодов. Это означает, что при непрерывных частотных зондированиях практически используется сплошной спектр частот.

Анализ показывает, что оптимальная величина параметра девиации γ может быть определена по формуле

$$\gamma = 1,57 \cdot 10^{-2} \rho \Delta f, \quad (2.12)$$

где ρ — требуемая точность регистрации кривых в процентах, а Δf — ширина полосы частот в герцах в области минимума кривой НЧЗ. В результате анализа кривых ЧЗ установлено, что минимальное значение Δf составляет около 10 Гц. Полагая ρ равным, например, 1%, получим величину $\gamma = 0,157$. Следовательно, при непрерывных частотных зондированиях реальных геологических структур время девиации частоты тока в диапазоне частот от 70 Гц до 10 кГц не должно быть менее 30 с.

АППАРАТУРА ДЛЯ ЗОНДИРОВАНИЙ НА ДИСКРЕТНЫХ ЧАСТОТАХ И ЕЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Блок-схема аппаратуры для электромагнитных зондирований на дискретных частотах приведена на рис. 2.7. Она состоит из двух установок: генераторной и измерительной.

Основными узлами генераторной установки являются: задающий генератор с кварцевой стабилизацией частоты 1, триггерная переключательная схема 2, усилитель мощности 3 и однофазный мостовой инвертор на тиристорах 4. Инвертор 4 вырабатывает ток по форме, близкой к прямоугольной. Нагрузкой служит питающий диполь АВ. Последовательно в цепи линии АВ помещен калиброванный резистор малой величины. Падение напряжения на r , пропорциональное силе тока в линии АВ, подается на вход измерительного квазирезонансного усилителя напряжения 5, настроенного на первую гармонику тока на каждой рабочей частоте. Калибровка усилителя 5 по напряжению производится путем подачи на его вход во время градуировочного цикла измерений калиброванного по амплитуде напряжения, частота которого соответствует частоте тока с выхода делителя напряжения 6, присоединенного к пересчетной схеме 2.

На рис. 2.7 приведена также блок-схема приемной установки. Измеряемый сигнал, снимаемый с концов диполя MN или рамки S, подается на блок входных фильтров 7, служащий для фильтрации принимаемых сигналов от помех. В дальнейшем сигнал после усиления

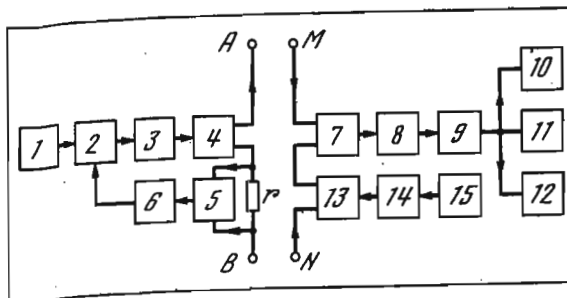


Рис. 2.7. Блок-схема аппаратуры для зондирования на дискретных частотах

широкополосным усилителем 8 подается на квазирезонансный усилитель напряжения 9, настроенный на каждую из рабочих частот. В этом усилителе происходит дальнейшая фильтрация измеряемых сигналов от помех, а также выделение первой гармоники тока. С выхода 9 сигнал подается одновременно на три устройства: на стрелочный измерительный прибор 10, катодный осциллоскоп 11 и цифровое устройство 12, в котором происходит накопление и осреднение измеряемого сигнала за заданный промежуток времени от нескольких десятков секунд до нескольких минут.

Калибровка усилителя 7-9 по напряжению производится путем подачи последовательно в цепь линии MN во время градуировочного цикла измерений калиброванного по амплитуде напряжения, частота которого точно соответствует частоте измерявшегося сигнала, снимаемого с делителя напряжения 13, присоединенного к пересчетной схеме 14. Работой пересчетной схемы управляет генератор с кварцевой стабилизацией частоты 15. Частоты генераторов 1 и 15 равны.

Технические характеристики станции для глубинных частотных зондирований СЧЗ-67 следующие.

Генераторная установка	
Диапазон рабочих частот, Гц	0,26-1083
Стабильность частоты, %	10 ⁻²
Количество рабочих частот	24
Величина активного сопротивления линии АВ, Ом	10 - 100
Индуктивность линии АВ, мГн	Не более 20
Источник питания генераторной установки	Два электрических генератора ПН-145
Максимальная мощность, отдаваемая в нагрузку, кВт	30
Максимальное значение силы тока в линии АВ, А	50
Погрешность определения силы тока первой гармоники, %	1,5
Приемная установка	
Диапазон амплитуд измеряемых сигналов, мкВ	1-10 000
Относительная ширина полосы пропускания, %	1 - 10

Уровень собственных шумов, приведенный ко входу, дБ	0,2
Источник питания	3 аккумулятора 5-НКН-60

Технические характеристики станции для малоглубинных частотных зондирований ВЧЗ-70 следующие.

Генераторная установка	
Диапазон рабочих частот, Гц	2,22-8666
Стабильность частоты, %	10 ⁻²
Количество рабочих частот	24
Величина активного сопротивления линии АВ, Ом	25-200
Индуктивность линии АВ, мГн	Не более 5
Максимальное напряжение источника питания, В	300
Максимальный ток в линии АВ, А	5
Погрешность определения силы тока первой гармоники, %	1,5
Источник питания	Бензоагрегат АБ-1-230 постоянного тока напряжения 220 В

Приемная установка

Диапазон амплитуд измеряемых сигналов, мкВ	1-10 000
Относительная ширина полосы пропускания, %	1 - 10
Уровень собственных шумов, приведенный ко входу, дБ	0,2
Источник питания	Сухие гальванические элементы типа МАРС

Аппаратура станций СЧЗ-67 и ВЧЗ-70 полностью выполнена на транзисторах и сохраняет работоспособность в диапазоне температур от 0° до 40°С и относительной влажности среды не более 80% при температуре 20°С. Обе эти станции разработаны Геологическим институтом АН СССР. Конструкция станций выполнена по физическому приборостроению АН СССР.

АППАРАТУРА ДЛЯ НЕПРЕРЫВНЫХ ЧАСТОТНЫХ ЗОНДИРОВАНИЙ И ЕЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАНТЕРИСТИКИ

Блок-схема аппаратуры генераторной установки станции НЧЗ приведена на рис. 2.8. Основными ее узлами являются: задающий генератор изменяющейся во времени частоты 1, автоматический регулятор силы тока в линии АВ 2, усилитель мощности 3, регистрирующий прибор силы тока в линии АВ 4 и выпрямитель 5.

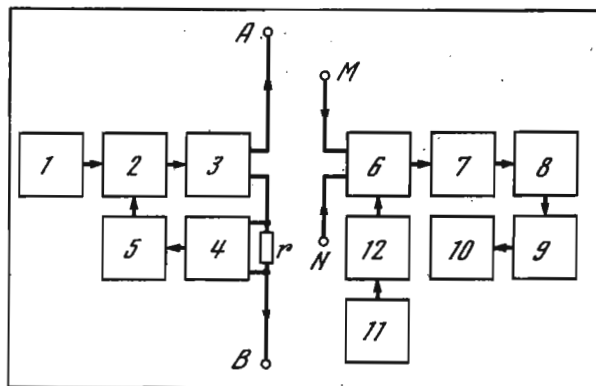


Рис. 2.8. Блок-схема аппаратуры для НЧЗ

Принцип работы аппаратуры генераторной установки НЧЗ заключается в следующем. Синусоидальное напряжение изменяющейся во времени частоты, снимаемое с выхода задающего генератора 1, проходит через автоматический регулятор тока 2 и подается на усилитель мощности 3, подключенный к питающему диполю АВ. Последовательно в цепи линии АВ помещен калиброванный резистор r малой величины. Падение напряжения на r , пропорциональное силе питающего тока, выпрямляется в 5 и подается на управляющее устройство 2. Коэффициент усиления 2 обратен пропорционален величине падения напряжения на резисторе r . Поэтому с помощью 2 сила тока в диполе АВ поддерживается постоянной в широком диапазоне рабочих частот. Регистратор 4 служит для записи тока в течение всего зондирования.

На том же рисунке приведена блок-схема приемной установки НЧЗ. Измеряемые сигналы, снимаемые с концов диполя MN или рамки s , подаются на первый усилительный каскад 6. Между первым усилительным каскадом 6 и вторым усилительным каскадом 8 помещен полосовой LC-фильтр 7, служащий для фильтрации принимаемых сигналов от помех, а также от составляющих шумов первого усилителя 6, лежащих за пределами рабочей полосы частот. В дальнейшем приемный сигнал после требуемого усиления широкополосным усилителем 9 подается на усилитель мощности регистратора 10. Градуировка чувствительности приемно-регистрирующего тракта по амплитуде производится путем подачи последовательно в цепь линии MN напряжения известной амплитуды, снимаемого с калиброванного делителя напряжения 12, связанного с выходом градуировочного генератора 11.

Технические характеристики станции для непрерывных частотных зондирований следующие.

Генераторная установка

Диапазон рабочих частот, Гц	60-10 000
Время девиации частоты в рабочем диапазоне частот, с	240

Максимальная мощность, Вт	200
Максимальный ток в линии АВ, А	2,5
Нелинейные искажения тока, %	1
Точность измерения силы тока, %	1,5

Измерительная установка

Диапазон амплитуд измеряемых сигналов, мкВ	5 - 1000
Ширина полосы пропускания, Гц	70-10 000
Уровень собственных шумов, приведенный ко входу, мкВ	1
Погрешность измерения амплитуд геосигналов, %	1,5

Подробное описание принципиальных схем аппаратуры станции НЧЗ приводится в заводской инструкции по эксплуатации.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ПОЛЕВЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В настоящее время промышленностью выпускается только станция НЧЗ. Поэтому ниже рассматривается в основном методика непрерывных частотных зондирований. Однако все выводы и методические приемы, которые будут описаны далее, могут быть использованы при проведении исследований методом частотных зондирований на дискретных частотах.

Полевые исследования методами ЧЗ и НЧЗ проводятся следующим образом. Пункт зондирования располагается в центре разброса, величина которого выбирается равной 4-5 глубинам исследования. Линия АВ по возможности располагается перпендикулярно направлению на измерительную установку. Измерительная линия MN также располагается перпендикулярно направлению на генераторную установку. После размещения на местности установки АВ-MN к линии АВ подключается генераторная, а к линии MN-измерительная установки и между ними устанавливается двусторонняя радиосвязь. Проверка готовности аппаратуры к зондированию производится в следующей последовательности.

Генераторная установка

1. С помощью омметра определяется величина переходного сопротивления заземления линии АВ и производится согласование выхода усилителя мощности с питающим диполем. Величина переходного сопротивления заземления линии АВ при НЧЗ не должна выходить за пределы 20-200 Ом, а при СЧЗ - 10-60 Ом. Силу тока в линии АВ при НЧЗ желательно выдерживать в пределах от 0,5 до 1,5 А, при ВЧЗ - от 0,5 до 5 А, а при глубинных зондированиях - от 20 до 50 А.

2. Включается аппаратура, проверяется наличие тока в линии АВ, работа задающего генератора НЧЗ и регистратора.

3. По окончании проверки сообщают по радио на приемную установку о готовности к работе.

Измерительная установка

1. Аппаратура измерительной установки подключается к линии *MN* и проверяется наличие и прохождение градуировочного сигнала через цепь линии *MN*.
2. Проводится оценка уровня помех и запись их на ленту переписца в течение 15–20 с (при работе методом НЧЗ), после чего выбирается система регистрации сигналов в зависимости от уровня помех (при работе методом СЧЗ).
3. По окончании проверки сообщают по радио на генераторную установку о готовности к работе.

Рабочий цикл измерений

Непрерывные частотные зондирования проводятся автоматически. Это означает, что после включения аппаратуры и регистрирующих устройств обеих установок непрерывное изменение частоты питающего тока во времени и регистрация кривой тока и кривой частотного зондирования производятся без вмешательства оператора, который только включает аппаратуру и задает режим работы (выбирает силу тока, чувствительность приемного канала и скорость регистрации). Автоматизация процесса измерений увеличивает производительность геологоразведочных работ и уменьшает влияние субъективных ошибок в процессе измерений. Вместе с тем при непрерывной и автоматической регистрации кривых, выражающих зависимость силы тока и величины принимаемых сигналов от частоты, возникает необходимость не только в строгом согласовании моментов начала и конца записей, но и в обеспечении постоянства скорости движения лент обоих регистрирующих устройств.

Постоянство скорости движения лент переписцев обеспечивается применением синхронных электрических моторов, питаемых стабилизированным по частоте переменным током. Согласование моментов начала и конца записи должно обеспечиваться с точностью порядка ± 1 с. Оно может быть достигнуто двумя способами.

Первый из них, который условно назовем способом "пассивного" согласования, заключается в следующем. Частотная характеристика измерительной установки НЧЗ в диапазоне частот 100 Гц–8 кГц имеет неравномерность, не превышающую 1дБ. На границах частотного диапазона в области частот 70–80 Гц и 9–10 кГц она имеет очень крутые склоны (частотный диапазон генераторной установки несколько шире: 60 Гц–11 кГц). Эта особенность строения частотной характеристики может быть использована для калибровки по частоте записи кривой на измерительной установке, которая осуществляется следующим образом.

На генераторной установке во время рабочего цикла измерений в питающий диполь *AB* сначала включают ток на фиксированной частоте 11 кГц. Переписец приемной установки включается, и начинается регистрация линии, соответствующей нулевому значению измеряемого сигнала, поскольку сигнал частоты 11 кГц практически

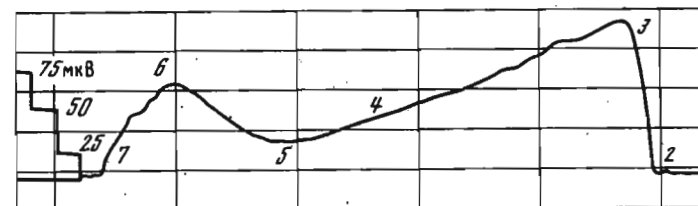


Рис. 2.9. Запись кривой НЧЗ типа Н

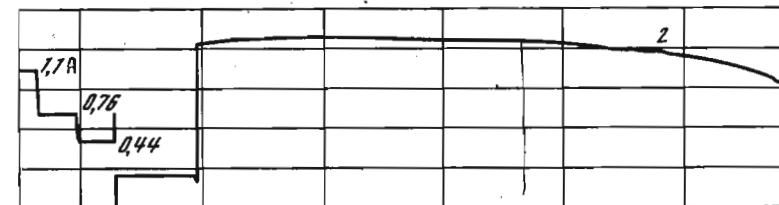


Рис. 2.10. Запись кривой силы тока в линии АВ при НЧЗ

полностью подавляется полосовым фильтром измерительной установки. Через 10–15 с после включения переписца измерительной установки на генераторной установке включается автоматическое устройство, осуществляющее девиацию частоты питающего тока. В процессе изменения частота тока проходит значения от 9–10 кГц в начале записи до 70–80 Гц в конце ее. Полоса прозрачности полосового фильтра приемной установки равна 70 Гц – 10 кГц. Поэтому амплитуда принимаемого сигнала в процессе регистрации по мере приближения к значению, равному 10 кГц, резко, почти скачкообразно будет возрастать, а в конце записи на частоте 70 Гц уровень сигнала столь же резко уменьшится.

На рис. 2.9 в качестве примера приведена запись кривой НЧЗ типа Н по составляющей поля H_z , полученная в Московской области, а на рис. 2.10 – соответствующая ей запись тока в линии АВ. Скорость движения ленты равнялась 1800 мм/ч. Частота тока изменялась по показательному закону, так что по оси абсцисс значения частот необходимо отсчитывать в логарифмическом масштабе, а значения амплитуд по оси ординат – в линейном. Участок кривой 1–2 на рис. 2.9 соответствует нулевой линии. Подъем кривой начинается на частоте около 10,5 кГц (в точке 2) и оканчивается на частоте 9 кГц (в точке 3). В этой точке снимается значение приемного сигнала для определения удельного сопротивления первого слоя. Пологая падающая ветвь на участке 3–4 характеризует тип привой. Наконец, отметим минимум кривой в точке 5 и максимум ее правой ветви в точке 6, после которой в соответствии с теорией начинается падение амплитуды принимаемого сигнала. В точке 7 частота равна 80 Гц. В конце ленты приведена градуировка записи сигнала в микровольтах.

Что же касается записи кривой тока, то в данном случае она мало зависит от частоты, за исключением участка кривой 1-2, соответствующего высоким частотам, на котором входное сопротивление линии АВ значительно повышается. В конце ленты приведена градуировка силы тока в амперах.

Таким образом, запись измеряемого сигнала на краях диапазона оказывается автоматически прокалиброванной по частоте.

Второй способ, который можно условно назвать "активным" согласованием, состоит в том, что включение переписцев обеих установок и устройства для девиации тока осуществляется одновременно по команде, подаваемой по радио с генераторной установки. Конец записи отмечается путем выключения тока. Второй способ обеспечивает несколько большую точность, особенно в тех случаях, когда запись сигналов производится при наличии большого уровня помех.

Градуировочный цикл измерений

Этот цикл необходим для калибровки записей тока и измеряемого сигнала по амплитуде. Для этого на генераторной установке после окончания рабочего цикла снова включают ток в линию АВ и производят три-четыре записи различных значений тока на частотах 100, 1000 и 10 000 Гц. Записываемые для калибровки тока должны соответствовать минимальному, среднему и максимальному значениям тока, зарегистрированного во время рабочего цикла измерений. Значения градуировочного тока в амперах считываются со шкалы стрелочного измерительного прибора первого класса точности, расположенного на панели усилителя мощности, и наносятся на ленту. По полученным данным строится градуировочная кривая, с помощью которой градуируется вся запись тока.

Аналогичным способом градуируется запись измеряемого сигнала. Для этого по окончании рабочего цикла измерений на приемной установке выключается градуировочный генератор и на ленту наносятся несколько значений калиброванного по амплитуде сигнала, соответствующих минимальному, среднему и максимальному значениям амплитуды сигнала.

В результате калибровки записей силы питающего тока в амперах и амплитуды сигнала в микровольтах еще не получают данные, необходимые для построения кривых НЧЗ, поскольку записи должны быть прокалиброваны не только по амплитуде, но и по частоте. Для этой цели используется масштабная логарифмическая линейка с непрерывно изменяющимся модулем (рис. 2.11). Минимальное и максимальное значения модуля выбираются таким образом, чтобы длина записей тока и приемного сигнала между отметками, равными значениям частот 70 Гц и 10 кГц, соответствовала среднему значению модуля на линейке. После совмещения линий на линейке с этими отметками производится определение положения экстремальных точек кривой на частотной оси и некоторого количества промежуточных точек, необходимых для построения кривой НЧЗ.

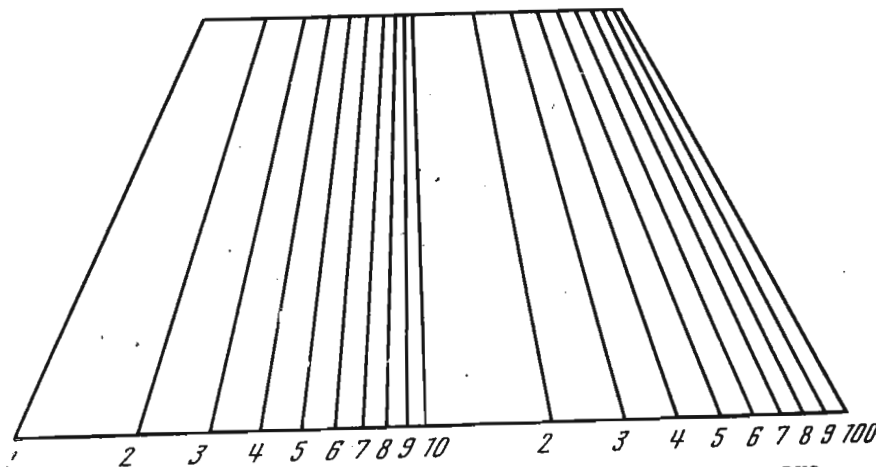


Рис. 2.11. Масштабная логарифмическая линейка с непрерывно изменяющимся модулем

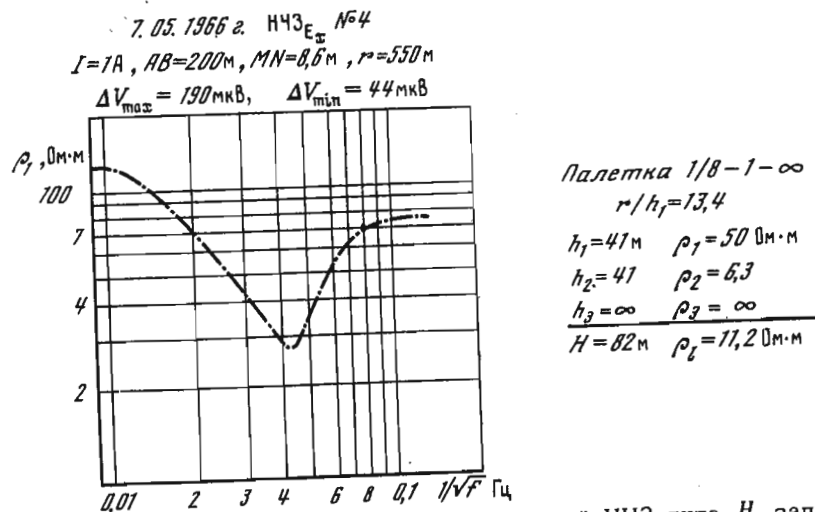


Рис. 2.12. Результаты интерпретации кривой НЧЗ типа Н, записанной в Московской области

Количество точек выбирается в зависимости от сложности строения кривой, но не менее 20-25. В выбранных точках записи, соответствующих одинаковому ряду частот на обеих лентах, определяются значения силы питающего тока в амперах и величин приемных сигналов в микровольтах, после чего вычисляются значения ρ_ω на различных частотах, производится построение кривой НЧЗ и ее интерпретация (рис. 2.12).

Выше было показано, что вследствие ограниченного диапазона боковых частот кривые зондирования нередко записываются лишь частично и не выходят на левую асимптоту. С такого рода случаями мы сталкиваемся, например, при решении задач, связанных с исследованием строения верхних горизонтов геоэлектрических разрезов, имеющих малые мощности или большие значения удельных сопротивлений.

Для проведения частотных зондирований в таких условиях необходимо использовать другую методику полевых исследований, получившую название дистанционных, или радиальных, зондирований, сущность которой состоит в следующем. На поверхности земли в пункте исследования на расстоянии r , много меньшем предполагаемой глубины исследования, располагаются обе установки для зондирования, после чего измеряется сигнал на одной из частот рабочего диапазона. В дальнейшем аналогично известной методике зондирования на постоянном токе измерения проводятся последовательно на различных разностях r от генераторной установки. При этом используются различные установки для зондирования.

Выбор частоты f_p при проведении радиальных зондирований производится в зависимости от значения среднего продольного сопротивления ρ_l изучаемой толщи. При этом предполагается, что глубина проникновения поля в толщу изучаемого разреза равна приблизительно мощности так называемого скин-слоя h_s в метрах:

$$h_s = 503,6 \cdot \sqrt{\rho_l} \frac{1}{\sqrt{f_p}} \quad (2.13)$$

По результатам измерений при радиальных зондированиях строятся кривые, выражающие зависимость величины кажущегося удельного сопротивления на переменном токе от величины разности r/λ_1 . Интерпретация кривых радиальных зондирований производится с помощью палеток, построенных таким образом, что по оси абсцисс откладываются значения r/λ_1 , а кривые оцифровываются величиной h_1/λ_1 .

Основное преимущество радиальных частотных зондирований по сравнению с методами постоянного тока заключается в возможности разведки осадочных толщ, содержащих горизонты высокого сопротивления, а также фундамента. Кроме того, при этом значительно уменьшаются требуемые величины разностей.

ЗОНДИРОВАНИЯ В УСЛОВИЯХ ПОМЕХ

При частотных зондированиях нередко приходится измерять амплитуды гармонических электрических сигналов, которые в большинстве случаев равны нескольким единицам или десяткам микровольт на фоне помех, уровень которых на входе приемного устройства превышает величину полезного сигнала во много раз.

Как известно, при проведении измерений электрических сигналов могут наблюдаться помехи двух типов: сосредоточенные и флуктуационные. Помехи первого типа в свою очередь могут быть подразделены на две категории: помехи, сосредоточенные по частоте, т.е. помехи на фиксированных частотах или в узком диапазоне частот, и помехи, сосредоточенные во времени, — импульсные. Флуктуационные помехи называются беспорядочные случайные отклонения измеряемой величины от ее среднего значения.

При частотных зондированиях мы сталкиваемся с помехами обоих типов. Прежде всего это помехи от силовых сетей переменного тока частоты 50 и 400 Гц, помехи от радиостанций, а также от промышленных и специальных установок. Далее необходимо отметить весьма интенсивные импульсные помехи от разрядов молний, соединений сетей постоянного тока, телеграфных и телефонных линий и др. Наконец, существуют весьма интенсивные помехи, вызываемые вариациями электромагнитного поля Земли.

Для борьбы с сосредоточенными помехами используют полосовые RC - и LC -фильтры; для борьбы с флуктуационными стремятся максимально сузить полосу пропускания измерительной аппаратуры, поскольку, как известно, рост ее помехоустойчивости обратно пропорционален квадратному корню из полосы пропускания.

При зондированиях на дискретных частотах используют узкополосную измерительную аппаратуру в сочетании с накопительными устройствами.

Отметим, что уровень помех при частотных зондированиях изменяется в широких пределах в зависимости от различных факторов. Практика показывает, что средний уровень флуктуационных помех не превышает 1–3 мкВ на метр длины линии MN . Ранней весной, поздней осенью и зимой уровень импульсных помех значительно понижается. Уровень помех при зондированиях по вертикальной компоненте магнитного поля, как правило, ниже, чем при зондировании по электрической компоненте в тех же условиях.

При непрерывных частотных зондированиях регистрируемые сигналы, как правило, на порядок превышают средний уровень помех, что дает возможность получения практически мало искаженных кривых. В тех случаях, когда непрерывные зондирования проводятся в особо неблагоприятных случаях, получение неискаженной записи кривой может оказаться затруднительным. На рис. 2.13 приведена осциллограмма импульсных помех большой интенсивности, обусловленных близкими разрядами молний, визуально наблюдавшихся в пункте записи, которая проводилась аппаратурой НЧЗ. Как видно из осциллограммы, амплитуда импульсной помехи не превышала в этих экстремальных условиях величины 75–150 мкВ при уровне регистрируемого полезного сигнала, равного около 200 мкВ. Поэтому за счет усреднения записи в этих условиях возможно получение вполне удовлетворительной кривой.

Во всех случаях для получения качественных полевых материалов рекомендуется по возможности не проводить зондирования на

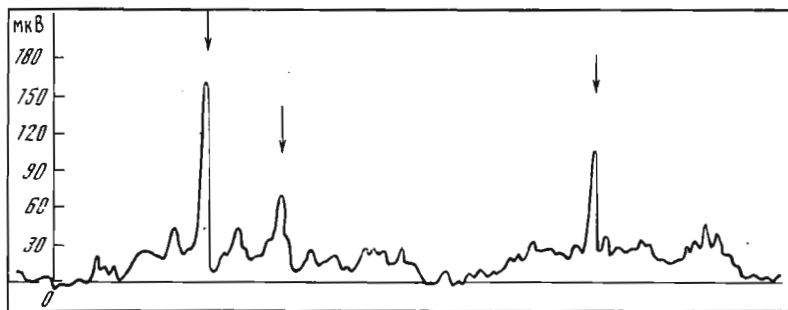


Рис. 2.13. Оциллографическая запись помех
Стрелками указаны помехи от близких разрядов молний

территории крупных населенных пунктов или промышленных предприятий, вблизи (ближе 500 м) линий электропередач, телефонных и телеграфных линий, электрифицированных железных дорог и прочих объектов, являющихся источниками особо интенсивных электрических помех.

Если проведение зондирований в особо трудных условиях все же окажется необходимым, то надлежит принять меры, направленные на снижение уровня помех, а именно: ориентировать приемный диполь перпендикулярно линиям передач, уменьшить до минимума величину разноса и увеличить до предела длину линии АВ и силу тока в ней, провести зондирование в ночное время, когда уровень помех снижается, и др. Можно также рекомендовать проведение нескольких зондирований в одном и том же пункте с последующим осреднением полученных записей.

МЕТОДИКА ЗОНДИРОВАНИЯ НИЗКООМНЫХ И ВЫСОКООМНЫХ ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТРУКТУР

Низкоомные структуры

Для значительной части платформенных областей Советского Союза (Западная Сибирь, Казахстан, Средняя Азия, Русская платформа и др.) характерны низкоомные разрезы со средними значениями продольных сопротивлений порядка единиц ом-метров и менее при глубине залегания опорного горизонта зондирования порядка 3-5 км и более.

Методические исследования, проведенные в этих районах (например, Гарецкий и др., 1967), показали, что при использовании существующей аппаратуры для глубинных частотных зондирований в диапазоне частот от 0,2 до 1100 Гц в условиях очень низкоомных разрезов удается зарегистрировать только левые ветви кривых без области минимума, что не дает возможности определения мощности всей осадочной толщи до опорного горизонта зондирования.

Значительное расширение рабочего диапазона частот существующей аппаратуры в сторону более низких частот по техническим причинам нецелесообразно. Гораздо более перспективным в таких случаях представляется комплексирование метода частотных зондирования с другими способами глубинной электроразведки, например методом становления поля (Иванов и др., 1964а; Обухов, 1968; Федоров, Тикшаев, 1969; Скугаревская, 1959; Тихонов и др., 1965; Тихонов, Скугаревская, 1950; Фролов, 1964, 1965; Черныш, 1953; Шейнман, 1947) или магнитотеллурического зондирования (МТЗ) (Завадская, 1964; Эненштейн и др., 1969). Это объясняется возможным потому, что методы частотного и магнитотеллурического зондирования основаны на единой теории распространения в земле гармонических колебаний электромагнитного поля, а методы становления поля (ЗСП) и частотного зондирования относятся в различной форме единый физический процесс распространения переменных электромагнитных полей, и поэтому их результаты (Дмитриев и др., 1973) легко сопоставимы. В настоящее время в практике электроразведки получило распространение комплексирование методов частотного зондирования и становления поля.

Большинство низкоомных разрезов в указанных выше районах представляет собой разрезы типа *H*, характеризующиеся большими значениями величины ν_2 и малыми значениями μ_2 .

Рассмотрим теоретические кривые частотного зондирования для электрической составляющей поля E_x для разреза типа *H*, имеющей, например, следующие параметры: $\mu_2 = 1/16$, $\nu_2 = 4$, $\mu_3 = \infty$, $\nu_3 = \infty$ (рис. 2.14). Из палетки следует, что для получения полной частотной кривой необходимо иметь возможность использовать при зондировании частоты, соответствующие значениям λ_1/h_1 от 2 до 300. При этом $(\lambda_1/h_1)_{\max} = 300$ можно считать нижней границей области больших значений λ_1/h_1 , начиная с которых частотные кривые выходят на горизонтальные асимптоты.

Предположим, что верхняя кровля опорного горизонта зондирования высокого сопротивления находится на глубине $H = h_1 + h_2 = 5000$ м. Будем считать, что сопротивление верхнего слоя разреза имеет значение $\rho_1 = 25$ Ом·м. Тогда при зондировании такого разреза наименьшая рабочая частота существующей аппаратуры ($f_{\min} = 0,2$ Гц) обеспечит значение λ_1/h_1 , равное 70, т.е. много меньшее требуемого значения $\lambda_1/h_1 = 300$, и зарегистрированными окажутся лишь левые ветви кривых без области минимума, что даст возможность определить только мощность и сопротивление первого и сопротивление второго слоев разреза.

Комплексирование методов ЧЗ и ЗСП производится следующим образом. Высокочастотная левая ветвь кривой зондирования регистрируется аппаратурой ЧЗ в диапазоне от 0,2 до 1080 Гц, после чего на этом же разносе той же установкой с помощью аппаратуры ЗСП регистрируется поздняя стадия становления поля в диапазоне времен от 0,1 до 100 с и более. Полученная кривая

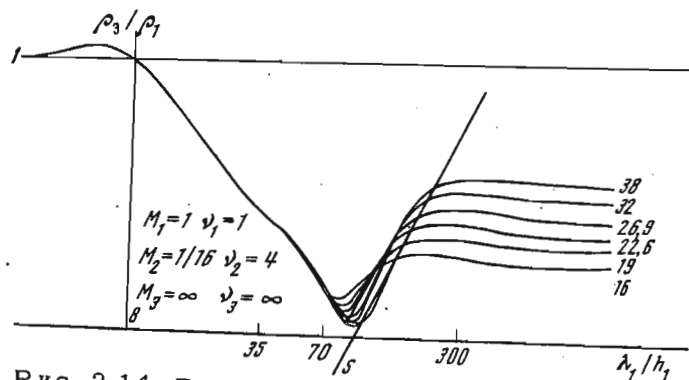


Рис. 2.14. Теоретическая трехслойная кривая ЧЗ типа H

ЗСП аналитическим путем преобразуется в низкочастотную недостающую часть кривой частотного зондирования, после чего обе части кривых соединяются.

Напомним, что становление поля представляет собой непрерывный процесс изменения во времени электромагнитного поля, возникающего в земле в момент мгновенного включения постоянного тока в питающий диполь и заканчивающегося стационарным распределением поля (Ваньян, 1966; Тихонов, 1946; Тихонов, Скугаревская, 1950; Четаев, 1953; Шейнман, 1947; и др.). В этом методе в отличие от методов ЧЗ и МТЗ импульс тока содержит сплошной спектр частот. При распространении возникающего в проводящей среде (исследуемом объеме земли) поля благодаря различному затуханию его составляющих спектральный состав регистрируемого импульса по сравнению со спектром импульса тока в пункте возбуждения поля окажется иным, причем появление фазовых сдвигов между отдельными частотами обуславливает временной характер процесса становления в целом.

Электромагнитное поле в период становления при выбранном разnose r будет зависеть от тех же параметров разреза μ_i, ν_i , что и в методе частотного зондирования, и, кроме того, от параметра самого процесса - времени становления t_s . Временная зависимость обычно выражается через величину $\tau = 10^7 t \rho_1 / \pi$ - так называемое характерное время, связывающее между собой время t в секундах и сопротивление первого слоя разреза ρ_1 в ом-метрах. В практических единицах рассматривается безразмерное характерное время τ/h_1^2 , где h_1 измеряется в метрах.

Как и в методе ЧЗ, поле становления можно пронормировать по полю в однородном полупространстве, имеющем сопротивление первого слоя разреза, и рассматривать кажущееся сопротивление по времени ρ_τ , которое вводится независимо для каждой компоненты поля.

Теоретические кривые ЗСП строятся так же, как и кривые ЧЗ, в логарифмическом масштабе и выражают собой зависимости кажущегося сопротивления ρ_τ / ρ_1 от величины τ/h_1^2 или $\tau^*/h_1 = \sqrt{2\tau}/h_1$. Величина τ^*/h_1 является аналогом относительной длины волны λ_1/h_1 в методе ЧЗ. Экспериментальные кривые становления поля строятся соответственно в виде зависимости кажущегося сопротивления ρ_τ от времени t или от $\sqrt{2\pi t}$. При этом кажущееся сопротивление для экваториальной установки ($\alpha = 0$, $\beta = 0$) рассчитывается по данным полевых измерений по тем же формулам, что и кажущееся сопротивление на переменном токе:

$$\rho_\tau = K_3 \frac{\Delta V_{E_x}(t)}{I}, \quad (2.14)$$

$$K_3 = \frac{\pi r^3 \cdot 10^{-6}}{AB \cdot MN}, \quad (2.15)$$

для электрической составляющей поля и

$$\rho_\tau = K_M \frac{\Delta V_{H_z}(t)}{I}, \quad (2.16)$$

где

$$K_M = \frac{2\pi r^4 \cdot 10^{-6}}{3AB \cdot s \cdot n}, \quad (2.17)$$

для магнитной составляющей.

Переход от кривой становления к кривой частотного зондирования осуществляется с помощью обратного преобразования Фурье. Для функции тока $i(t)$ и становления поля $f(t)$ находятся соответствующие им спектральные характеристики $I(\omega)$ и $F(\omega)$. Сравнение модулей этих характеристик, определяемых для различных фиксированных частот, позволяет построить амплитудную, а определение разности фаз между $I(\omega)$ и $F(\omega)$ - фазовую кривые частотного зондирования (Иванов и др., 1963).

Пусть в заземленный электрический диполь включается постоянный электрический ток по закону

$$i(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t < 0, \\ I & \text{при } t \geq 0. \end{cases} \quad (2.18)$$

Представим (2.18) при помощи интеграла Фурье в виде бесконечной совокупности гармонических колебаний непрерывного спектра частот:

$$i(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} I(\omega) e^{-i\omega t} d\omega, \quad (2.19)$$

где

$$K(\omega) = -\frac{1}{i\omega} = \frac{1}{\omega} e^{i\frac{\pi}{2}} \quad (2.20)$$

— спектральная характеристика функции (2.19). В выражении (2.20) отношение $1/\omega$ есть амплитуда, а $\pi/2$ — фаза колебания частоты. Согласно преобразованию Фурье

$$F(\omega) = \int_0^{\infty} f(t) e^{i\omega t} dt, \quad (2.21)$$

где $f(t)$ — любая из составляющих поля в пункте приема. Вычисление (2.21) проводится по способу численного интегрирования с учетом того, что $f(t) \equiv 0$ при $t < 0$.

Рассмотрим сначала становление магнитного поля. Для получения функции $f(t)$ кривая становления строится в линейном масштабе. По оси абсцисс откладывается время в секундах, а по оси ординат — значение кажущегося сопротивления ρ_r . При построении экспериментальной кривой становления приходится сталкиваться с тем обстоятельством, что на практике, как указывалось выше, регистрируется лишь поздняя стадия становления без начальной части кривой, тогда как в интеграл (2.21) входит значение функции становления $f(t)$ для значений времени t от нуля до бесконечности. Иначе говоря, для вычисления $F(\omega)$ незарегистрированную начальную часть кривой становления необходимо достроить. Для этого используется экспериментальная ветвь кривой частотного зондирования, интерпретация которой позволяет определить сопротивления ρ_1 и ρ_2 и, следовательно, значение μ_2 .

С построенной кривой становления ординаты снимаются с момента времени, равного нулю, до значения $t = t^*$, начиная с которого кривая становления может описываться асимптотической формулой. Последняя соответствует представлению интеграла (2.21) в виде двух слагаемых:

$$F(\omega) = \int_0^{t^*} f(t) e^{i\omega t} dt + \int_{t^*}^{\infty} f(t) e^{i\omega t} dt = F_1(\omega) + F_2(\omega).$$

Интеграл $F_1(\omega)$ вычисляется численным интегрированием, а добавочный член $F_2(\omega)$ — путем представления функции становления для времен $t > t^*$ с помощью асимптотической формулы

$$f(t) = Mt^{-4},$$

где значение M не зависит от t и снимается с экспериментальной кривой. Тогда интеграл $F_2(\omega)$ сводится к табулированным функциям — интегральным синусам и косинусам. Расчеты показывают, что в том случае, когда величина t выбрана так, что $f(t^*) < 0,05 < \max f(t)$ добавочным членом $F_2(\omega)$ при вычислениях по формуле (2.21) можно пренебречь.

Ординаты ρ_r , снятые с экспериментальной кривой становления, подставляются в интеграл (2.21) вместо функции $f(t)$. Отдельно вычисляются действительная $A(\omega)$ и мнимая $B(\omega)$ части интеграла:

$$F(\omega) = A(\omega) + iB(\omega), \quad (2.22)$$

где

$$A = \int_0^{t^*} f(t) \cos \omega t dt, \quad B = \int_0^{t^*} f(t) \sin \omega t dt.$$

Вычисления производятся для каждой выбранной частоты $f = \omega/2\pi$, соответствующей одной точке на кривой частотного зондирования. Для получения кажущегося сопротивления на переменном токе следует учесть соотношение (2.20) между силой постоянного тока I и силой тока частоты f . Учет этого соотношения производится путем умножения (2.22) на множитель $-i\omega$. Таким образом, при пренебрежении добавочным членом $F_2(\omega)$ для магнитного поля получается следующее выражение для кажущегося сопротивления, соответствующее выбранной частоте f :

$$\rho_M = 2\pi f \sqrt{A^2 + B^2}.$$

Для расчета фазы ϕ_M будем иметь

$$\phi_M = \text{arctg}(-A/B).$$

При использовании электрической составляющей поля следует учесть, что кривая становления в этом случае выходит на правую асимптоту, имеющую значение $\rho_r^{\text{стац}}$ (рис. 2.15). Поэтому спектр становления электрического поля включает в себя дополнительно спектр прямоугольного импульса амплитуды $\rho_r^{\text{стац}}$. Введем вспомогательную величину $\bar{\rho}_r = \rho_r^{\text{стац}} - \rho_r(t)$. Тогда для получения спектральных характеристик при интегрировании необходимо использовать формулу

$$F_3(\omega) = \int_0^{\infty} \rho_r^{\text{стац}} e^{i\omega t} dt - \int_0^{\infty} \bar{\rho}_r(t) e^{i\omega t} dt = \frac{\rho_r^{\text{стац}}}{-i\omega} - \int_0^{\infty} \bar{\rho}_r(t) e^{i\omega t} dt.$$

К настоящему времени рядом авторов предложены удобные на практике приемы пересчета кривых становления поля в кривые частотного зондирования, позволяющие получать полную частотную кривую при зондировании низкоомных разрезов непосредственно в полевых условиях.

Точность построения амплитудно-фазовых кривых частотного зондирования по описанной методике определяется двумя причинами: а) ошибками, связанными с аналитическим преобразованием функции становления; б) погрешностями, обусловленными воздействием

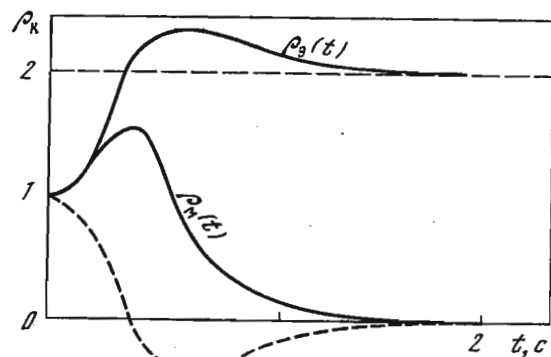


Рис. 2.15. Кривые становления поля

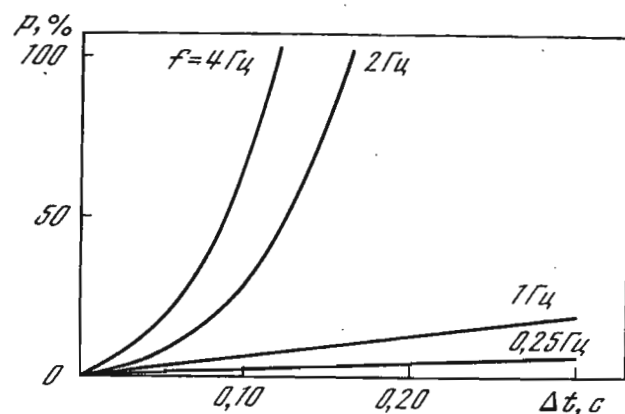


Рис. 2.16. График зависимости точности пересчета кривой становления поля от выбранного шага интегрирования

вием помех различного происхождения при регистрации процесса становления.

Остановимся сначала на ошибках, связанных с аналитическим преобразованием кривых становления. Эти ошибки определяются прежде всего величиной шага интегрирования функции становления $f(t)$. На рис. 2.16 приведен график точности расчетов амплитуды магнитного поля в зависимости от выбранного шага интегрирования Δt для различных частот f . На графике по оси абсцисс отложена величина шага интегрирования в секундах, а по оси ординат — величина $p = \Delta H_z / H_z$ в процентах. Все кривые построены по максимальной ошибке. Из графика следует, что для частот менее 1 Гц шаг интегрирования может быть выбран достаточно большим без существенного снижения точности преобразования. Кроме того, при проведении этого преобразования возможно возникно-

мно ошибок вследствие того, что на практике кривые становления регистрируются в ограниченном интервале времен, определяемом полосой пропускания регистрирующей аппаратуры.

Отметим, что наибольшие ошибки при построении частотных кривых из кривых становления возникают в том случае, когда запись кривой становления осложнена помехами, и определяются видом помехи.

Предположим, например, что в результате воздействия очень высокочастотных помех вся кривая становления оказывается более или менее равномерно смещенной по амплитуде на всем временном интервале регистрации, т.е. приподнята или опущена относительно истинного хода кривой становления на некоторую постоянную величину $\Delta f(t) = c$. Очевидно, что в этом случае спектральная функция (2.21) будет содержать ошибку

$$\Delta F(\omega) = \pm \frac{c}{i\omega}.$$

При воздействии помех, носящих импульсный характер, возникают искажения отдельных участков кривой становления и появляется необходимость учета помехи в каждом конкретном случае. Тогда функция становления представляется в виде суммы истинной кривой $f(t)$ и помехи $\Delta f(t)$ и при вычислении амплитудно-фазовых кривых необходимо учитывать спектр помехи $\Delta f(t)$. Поскольку спектр импульса определяется в основном его длительностью, то кратковременные помехи будут вызывать наибольшие искажения в высокочастотном участке спектра кривых становления, а помехи большой длительности — в низкочастотном участке.

Высокоомные разрезы

При зондированиях высокоомных геоэлектрических разрезов регистрируются только правые ветви кривых. В таких случаях недостающую левую ветвь кривой получают с помощью аппаратуры для малоглубинных частотных зондирований, рассчитанной на работу в диапазоне более высоких частот. Однако, поскольку такие зондирования выполняются на разностях существенно меньших, полученную кривую необходимо проинтерпретировать и использовать данные о строении верхних слоев разреза для построения полной кривой глубинного зондирования. При необходимости на участке профиля исследования между питающей и приемной линиями следует провести несколько малоглубинных зондирований.

Определение погрешности измерений

При проведении исследований методом частотных зондирований полевые измерения производятся с погрешностью, величина которой определяется в основном нестабильностью характеристик аппаратуры и действием помех. Используя некоторые особенности строения кривых частотного зондирования, можно непосредственно

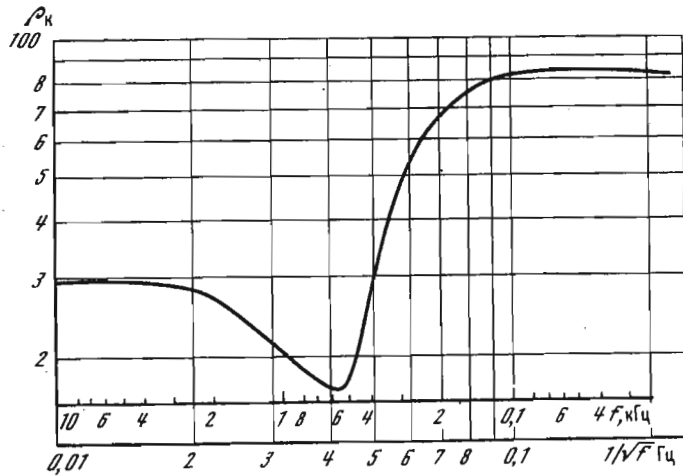


Рис. 2.17. Экспериментальная двухслойная кривая ЧЗ типа $\rho_2 = \infty$

в ходе полевых исследований осуществлять контроль за качеством получаемого материала.

Как известно, форма кривых частотного зондирования для выбранного типа установок зависит только от строения изучаемого разреза, т.е. от относительных величин мощностей и удельных сопротивлений слагающих его слоев и величины разноса, и не зависит от абсолютных величин удельных сопротивлений слоев, выражающихся в ом-метрах, поскольку они определяют только диапазон частот, необходимых для регистрации кривых, но не их форму. Следовательно, проведя интерпретацию экспериментальной кривой с помощью палетки, можно определить значение мощностей отдельных слоев разреза (например, первого слоя мощностью h_1) даже в тех случаях, когда абсолютные значения величин ρ_ω , отложенные по оси ординат экспериментальной кривой, по тем или иным причинам были определены с погрешностью. Далее, располагая данными о величине h_1 , можно с помощью той же палетки определить значение абсциссы λ_1/h_1 любой характерной точки кривой и, следовательно, вычислить значение ρ_1 , поскольку значение частоты в этой точке легко определяется из экспериментальной кривой с точностью, значительно превышающей точность определения ρ_ω . Вычисленное значение ρ_1 сопоставляется со значением этой величины, определенной экспериментальным путем, после чего производится анализ причин, обусловивших появление ошибок измерений.

В качестве примера проведем определение величины ρ_1 путем анализа строения двухслойной экспериментальной кривой типа $\rho_2 = \infty$, приведенной на рис. 2.17. Данная кривая записана на разносе $\tau = 800$ м, а величина τ/h_1 , определенная с помощью двухслой-

ной теоретической кривой, равна 5,6. Следовательно, величина мощности первого слоя $h_1 = 143$ м. Значение частоты в минимуме экспериментальной кривой 560 Гц. Величина λ_1/h_1 в точке минимума кривой при $\tau/h_1 = 5,5$, определенная по палетке, будет

$$\lambda_1/h_1 = a = 5,1.$$

Длина волны λ в метрах равна $\lambda = \sqrt{10^7 \rho_1 / f}$. Значение удельного сопротивления верхнего слоя в разрезе типа $\rho_2 = \infty$ может быть определено по формуле

$$\rho = 10^7 a^2 h_1^2 f_{\min}^2, \quad (2.23)$$

где f_{\min} — частота в герцах в минимуме двухслойной экспериментальной кривой зондирования. Из (2.23) имеем: $\rho_1 = 29,8$ Ом·м. Значение этой величины, определяемое по экспериментальной кривой, равно 29 Ом·м. Следовательно, значение ρ_1 в рассматриваемом случае было определено экспериментальным путем с погрешностью, не превышающей 2,76%.

Аналогичным образом проводится анализ многослойных кривых. Для этого используются соответствующие многослойные теоретические кривые, по которым определяется значение a в характерных точках кривых.

О ЗОНДИРОВАНИИ В УСЛОВИЯХ СЛОЖНОГО РЕЛЬЕФА МЕСТНОСТИ

В целом ряде случаев необходимо проводить частотные зондирования в районах, характеризующихся сложным рельефом местности. Оценка влияния рельефа местности на форму кривых частотного зондирования очень сложна и требует учета большого числа разнообразных факторов, влияющих на распространение электромагнитных волн вдоль негоризонтальной границы раздела земля-воздух, что связано с большими аналитическими трудностями, практически исключающими строгое решение задачи. Поэтому ниже сделаем попытку оценки влияния рельефа в первом приближении, к тому же учитывая только один из факторов, который, на наш взгляд, играет заметную роль.

Экспериментальные исследования показали, что наибольшее влияние рельефа на форму кривых ЧЗ наблюдается в тех случаях, когда длина волны поля в проводящей среде (верхнем слое разреза) сопоставима с геометрическими размерами неоднородностей, формирующих рельеф земной поверхности в пункте исследования. По мере понижения частоты такое влияние резко уменьшается. Это обстоятельство в какой-то мере может быть объяснено наличием явления скин-эффекта, вследствие которого глубина проникновения

Таблица 2

Значения мощности скин-слоя (в м) в зависимости от частоты тока и мощности верхнего слоя разреза

$\rho_1, \text{ Ом}\cdot\text{м}$	$f, \text{ Гц}$			
	10^2	10^3	10^4	10^5
10	160	50,5	16,0	5,0
20	227	71,8	22,7	7,2
30	260	82,0	26,0	8,2
50	358	113,0	35,8	11,3
100	506	160,0	50,6	16,0

поля в толщу изучаемого разреза практически ограничена мощностью скин-слоя h_s , зависящей от частоты тока и среднего продольного сопротивления разреза (для высоких частот - от сопротивления верхнего слоя ρ_1), причем

$$h_s = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \sigma_1}} = 503,6 \sqrt{\rho_1} \frac{1}{\sqrt{f}}, \quad (2.24)$$

где ω - круговая частота тока в герцах, μ - магнитная проницаемость, равная $4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м, а σ_1 - удельная проводимость пород в обратных Ом-метрах.

В табл. 2 приведены значения h_s , рассчитанные по (2.24) для различных значений ρ_1 и f . Из таблицы видно, что при значениях частот выше $10^2 - 10^3$ Гц мощность скин-слоя невелика и может оказаться существенно меньше по сравнению с геометрическими размерами отдельных элементов (поднятий и впадин), слагающих рельеф дневной поверхности, особенно в горных районах.

Обозначим амплитуду поднятия (или впадины) в метрах через A , а ее ширину у основания - через B (рис. 2.18). Предположим далее, что фактическая, т.е. "действующая", величина разноса r для высоких частот, распространяющихся в верхнем слое разреза вблизи границы раздела земля-воздух, не будет равна длине прямой, соединяющей центры питающего и приемного диполей, а будет увеличиваться по мере роста частоты тока и в пределе, при $f \rightarrow \infty$, будет равна длине кривой, описывающей рельеф дневной поверхности вдоль профиля исследования. Величина r входит в формулу для коэффициента установок зондирования в третьей и четвертой степенях. Поэтому в ряде случаев значения ρ_ω , определенные по (2.1) без учета влияния рельефа местности, могут быть найдены с большими ошибками.

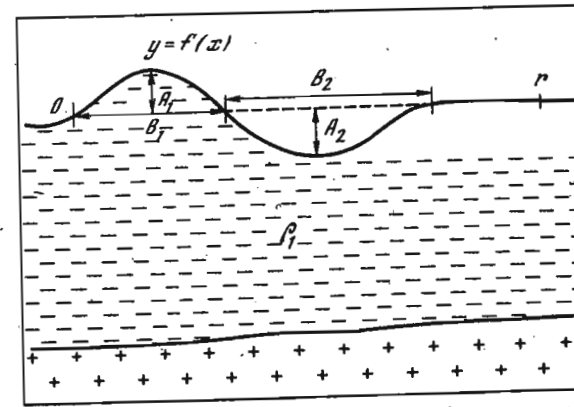


Рис. 2.18. Схема рельефа дневной поверхности

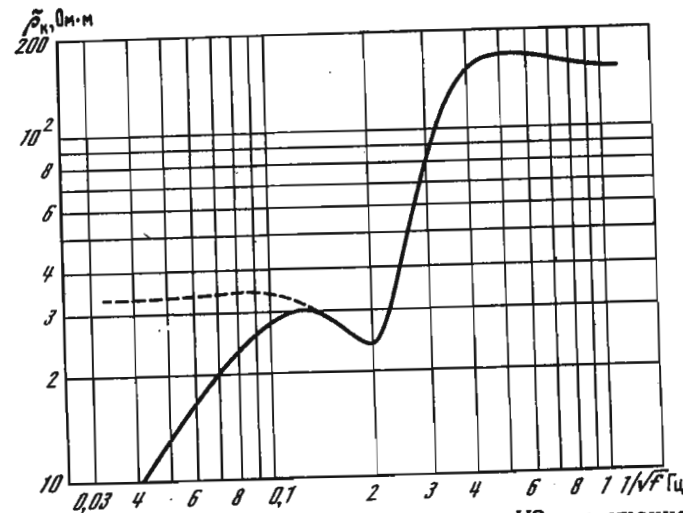


Рис. 2.19. Экспериментальная кривая ЧЗ, полученная в условиях сложного рельефа местности

Пусть $f(x)$ - функция, описывающая рельеф дневной поверхности вдоль профиля исследования. Тогда в пределе, при $f \rightarrow \infty$, величина r будет равна длине огibaющей l :

$$l = \int_0^r \sqrt{1 + [f'(x)]^2} dx. \quad (2.25)$$

Разобьем профиль на отдельные участки - элементы рельефа и будем аппроксимировать их либо отрезками прямых, либо отрезками синусоид:

$$y = A \sin x. \quad (2.26)$$

Таблица 3

Значения погрешностей определения величины ρ_1 с учетом влияния рельефа местности

A/B	Угол падения склона $\alpha = \text{arctg}(2A/B)$	ρ_3^*/ρ_3	ρ_M^*/ρ_M
0,04	4°27	1,01	1,02
0,08	9 5	1,12	1,17
0,12	13 30	1,44	1,63
0,16	17 45	1,77	2,14
0,20	21 48	2,41	3,22
0,24	25 38	2,92	4,18
0,28	29 15	3,72	5,77
0,32	32 37	4,91	8,35

В последнем случае, подставляя (2.26) в (2.25) и опуская промежуточные вычисления, получим выражение для l через эллиптический интеграл второго рода:

$$l = \sqrt{1+A^2} \int_0^{\pi/2} \sqrt{1 - \frac{A^2}{1+A^2} \sin^2 x} dx. \quad (2.27)$$

В табл. 3 приведены результаты определения отношения величин ρ_3^* и ρ_M^* , рассчитанных по (2.1) и (2.27) с учетом влияния рельефа, к соответствующим величинам ρ_3 и ρ_M , рассчитанным без учета этого влияния, для различных отношений A/B. Из таблицы видно, что погрешность определения ρ_ω на высоких частотах в условиях, характеризующихся сложным рельефом местности, может достигать сотен процентов.

На основании проведенного приближенного анализа экспериментальных кривых можно сделать вывод, что на практике влиянием рельефа можно пренебречь в тех случаях, когда геометрические размеры поверхностных неоднородностей существенно (в 3 раза и более) меньше длины волны поля в верхнем слое.

На рис. 2.19 в качестве примера приведена кривая ЧЭЗ по составляющей поля E_x , полученная в Грузинской ССР. Величина разноса равнялась 13 500 м. Величина A изменялась в пределах 200–400 м, A/B – 0,3–0,35, а $\rho_1 = 10 \div 30$ Ом·м. Наивысшая рабочая частота равнялась 1083 Гц. Сложный рельеф местности (горный район) обусловил сильные искажения кривой на высоких частотах. Пунктирной линией на рисунке показан ход кривой, построенной с учетом искажающего влияния рельефа. Из рис. 2.19 видно, что кривая ЧЭЗ без учета влияния рельефа соответствует

по строению четырехслойной кривой типа КН, в то время как в действительности она является двуслойной типа $\rho_2 = \infty$.

Необходимо отметить, что, проводя оценку влияния рельефа описанным выше способом, следует соблюдать большую осторожность и не только тщательно учитывать особенности строения рельефа вдоль профиля исследования, но и правильно определять значения среднего продольного сопротивления верхних слоев исследуемого геоэлектрического разреза.

О ЧАСТОТНЫХ ЗОНДИРОВАНИЯХ НЕГОРИЗОНТАЛЬНЫХ НАПЛАСТОВАНИЙ

В практике нередки случаи, когда экспериментальные кривые частотных зондирований по своей форме значительно отличаются от теоретических кривых, рассчитанных для горизонтально-слоистых сред, или близки к ним по форме, но не могут быть правильно проинтерпретированы с помощью палеток, рассчитанных для горизонтально-слоистых сред.

По данным ряда авторов, проводивших анализ материалов полевых исследований, искажения кривых электромагнитных зондирований связаны в основном с особенностями геологического строения изучаемого разреза и в меньшей степени – с влиянием рельефа дневной поверхности и, в частности, с негоризонтальным расположением установок. Значительные искажения формы кривых ЧЗ возникают также и при наличии в разрезе высокоомных образований, низкоомных включений или негоризонтальных контактов пород, имеющих различную проводимость.

В связи с большими математическими трудностями, возникающими при решении такого рода задач, для выяснения причин искажений кривых ЧЗ во ВНИИгеофизики и в ряде других научно-исследовательских организаций в течение многих лет проводятся модельные исследования. Особенно большой объем таких работ выполнен во ВНИИгеофизики А.Н. Кузнецовым (1966) на электролитической модели.

Модельные исследования проводятся установками, ориентированными вкост простирания структур и по их простиранию. При расположении приемного диполя относительно питающего в сторону восстания структур зондирование принято называть плюсовым, а в сторону падения – минусовым. Плюсовые и минусовые зондирования, выполненные на одном и том же участке профиля с переменной мест питающего и приемного диполей, называют встречными. Частотные кривые, полученные при встречных зондированиях негоризонтальных напластований, отличаются друг от друга, что не имеет места при зондированиях горизонтально-слоистых структур. Это обстоятельство дает возможность обнаружить искажения кривых зондирований (Терехин, Фомина, 1963).

Даже качественный анализ искаженных частотных кривых весьма сложен, требует привлечения очень большого числа данных модель-

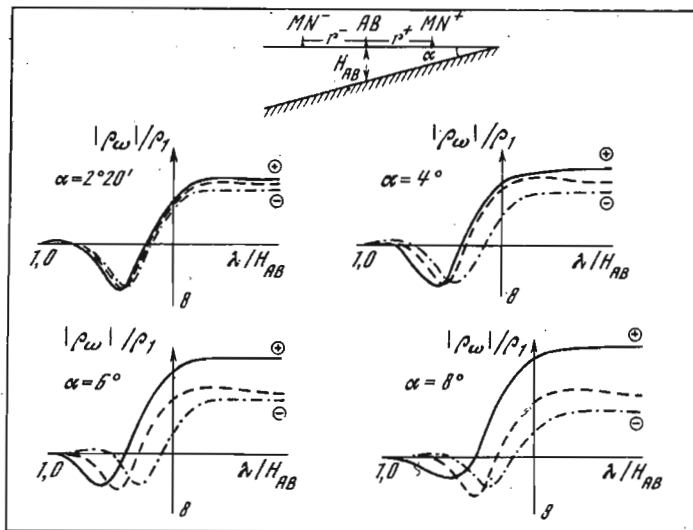


Рис. 2.20. Кривые ЧЗ негоризонтальных структур по данным модельных исследований

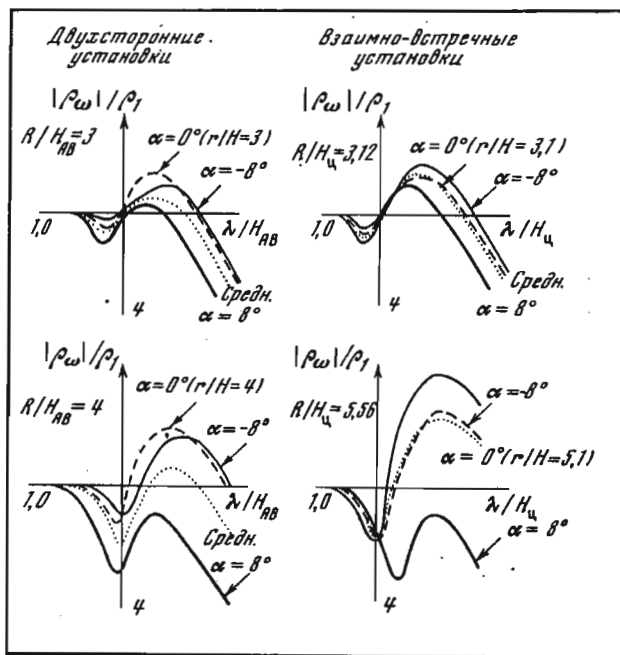


Рис. 2.21. Кривые ЧЗ негоризонтальных структур, записанные с помощью двусторонних и взаимно-встречных установок по данным модельных исследований

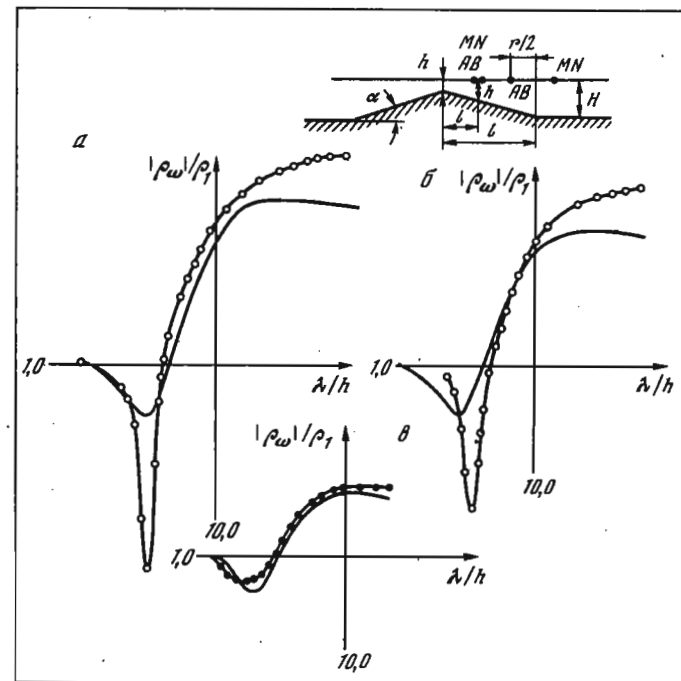


Рис. 2.22. Кривые ЧЗ над антиклиналью по данным модельных исследований

ных исследований и вследствие этого в настоящей книге не приводится. На рис. 2.20–2.28 в качестве примеров приведены отдельные кривые частотного зондирования, полученные А.Н. Кузнецовым.

На рис. 2.20 показаны кривые ЧЗ по составляющей поля E_x , полученные при зондировании геологических структур, в пределах которых наблюдается резкое сокращение мощности или полное выклинивание проводящего основания под углом $\alpha = 2^\circ 20'$ до $\alpha = 8^\circ$. Сплошными линиями на рисунке показаны плюсовые кривые, штрих-пунктирными – минусовые, а штриховыми – кривые, соответствующие двухслойной горизонтально-слоистой среде.

На рис. 2.21 приведены частотные кривые по составляющей поля H_z , полученные в тех же условиях при $\alpha = 8^\circ$ с помощью двусторонних и взаимно-встречных установок. Сплошными линиями показаны плюсовые и минусовые кривые, штриховыми – кривые для двухслойного горизонтально-слоистого разреза, а пунктирными – осредненные кривые. Как видно из рис. 2.21, при использовании при зондировании взаимно-встречных установок результаты осреднения кривых хорошо совпадают с кривыми, полученными при зондировании горизонтально-слоистых сред. Методика таких зондирований предложена во ВНИИгеофизики Л.Л. Ваньяном, Е.И. Терехиным, В.И. Фоминной и др. (Терехин, Фомина, 1963).

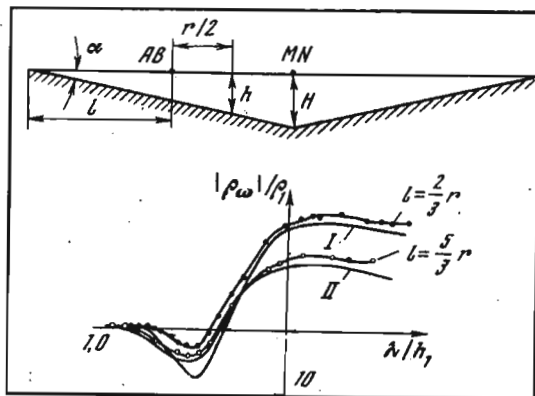


Рис. 2.23. Кривые ЧЗ над синклиналью по данным модельных исследований

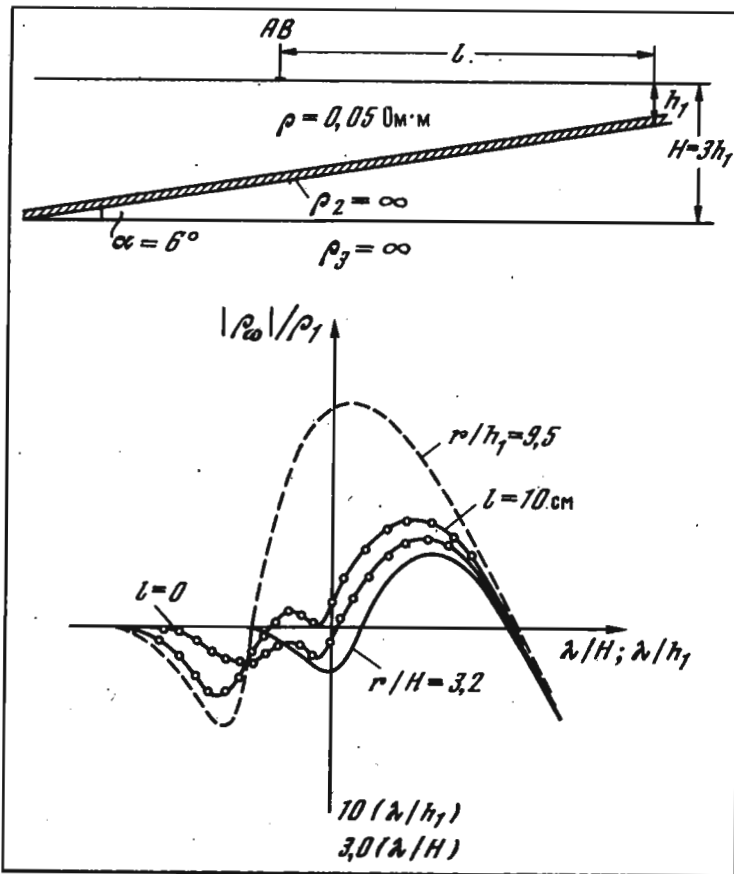


Рис. 2.24. Кривые ЧЗ, полученные вблизи края выклинивающегося экрана по данным модельных исследований

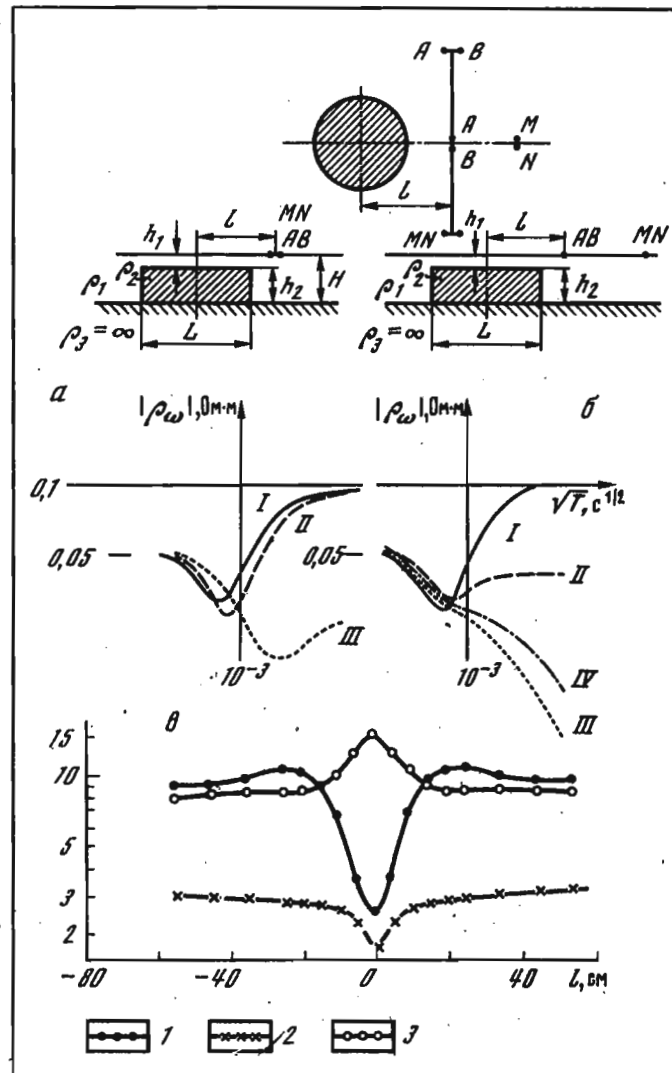


Рис. 2.25. Кривые ЧЗ над проводящей линзой по данным модельных исследований

На рис. 2.22 приведены сильно искаженные кривые ЧЗ по составляющей поля E_x , зарегистрированные при зондировании над антиклиналью ($\alpha = 17^\circ$, $h = 7$ см, $H = 22$ см, $\rho_1 = 0,05$ Ом·м). На рис. 2.25, а показаны сильно искаженные кривые ЧЗ, записанные над сводом антиклинали: $l = 0$, $r/h = 10$; на рис. 2.25, б — кривые ЧЗ, полученные вблизи свода антиклинали: $l = 10$ см, $r/h = 7,0$; на рис. 2.25, в — кривые зондирования для случая, когда над сводом антик-

линали находился питающий диполь AB . Линии с точками – экспериментальные кривые, сплошные линии – теоретические кривые для двуслойного разреза.

На рис. 2.23 приведены искаженные кривые частотного зондирования по компоненте поля E_x над синклиналью ($\alpha = 8^\circ$, $r = 3H$). Сплошная линия I – теоретическая кривая ЧЗ для двуслойного разреза при $r/h = 5,7$, сплошная линия II – та же кривая при разности $r/h = 3,3$.

На рис. 2.24 показана кривая ЧЗ для случая, когда один из диполей установки $AB-MN$ приближался к краю выклинивающегося промежуточного слоя высокого сопротивления на расстояние порядка $1/3-1/4$ величины разности. В этом случае на кривых появлялись весьма характерные искажения, характеризующиеся наличием двух интерференционных минимумов. При интерпретации таких кривых с использованием данных о координатах первого минимума кривой определяется мощность первого слоя разреза до кровли слоя высокого сопротивления, а с помощью данных о координатах второго минимума (на более низких частотах) – мощность всей осадочной толщи. Пример интерпретации такой кривой будет приведен в гл. III настоящей книги.

На рис. 2.25 приведены кривые ЧЗ и графики, иллюстрирующие поведение некоторых особых точек кривых ЧЗ вдоль профиля исследования, проходившего над проводящей линзой при следующих параметрах разреза и установки для зондирования: $\rho_1 = 0,05$ Ом·м, $\rho_2 = 0,0001$ Ом·м, $\rho_3 = \infty$, $r = 50$ см, $h_1 = 3,5$ см, $h_2 = 10$ см, $H = 13,5$ см, $L = 30$ см. Кривые, полученные при расположении установки $AB-MN$ перпендикулярно профилю наблюдения, показаны на рис. 2.25, а; на рис. 2.25, б – по профилю. Кривые $I-IV$ получены на различных удалениях l от центра линзы: кривые I при $l = 55$ см, II – при $l = 15$ см, III – при $l = 0$ и IV – при $l = 10$ см. На рис. 2.25, в приведены графики значений ρ_ω вдоль профиля наблюдения в точке минимума кривой ЧЗ (кривая 1), значений $\sqrt{T_{\min}}$ (кривая 2) и асимптотических значений $\rho_\omega = \rho_1$ при $f = 150$ кГц (кривая 3).

Задача интерпретации экспериментальных кривых частотного зондирования состоит в определении геоэлектрического строения разреза. В настоящее время методика интерпретации этих кривых еще находится в стадии разработки, однако предложены весьма эффективные приемы интерпретации кривых различных типов, которые уже сейчас можно рекомендовать для использования на практике (Иванов, 1975; Матвеев, 1974; Шахсуваров, 1959б; Шевнин, 1973; Энешгейн, 1957а,б, 1966а,б,в, 1967, 1973).

Интерпретация кривых проводится обычно в два этапа; сначала определяют тип геоэлектрического разреза, т.е. проводят качественную интерпретацию, а затем количественную – определяют параметры разреза (мощности и удельные сопротивления слагающих его слоев). Заметим, что в конкретных практических задачах интерпретация может ограничиться определением только отдельных элементов разреза, например глубины залегания фундамента, суммарной проводимости разреза, мощностей и глубин погружения высокоомных или низкоомных прослоев в разрезе и др. Как показано в гл. I, на кривых частотного зондирования можно выделить ряд характерных особенностей их строения. К ним относятся: левые и правые асимптоги, ниспадающие и восходящие ветви, максимумы и минимумы. Рассматривая самые общие качественные закономерности строения кривых, отметим, что наличие в разрезе слоев различного удельного сопротивления приводит к изменению хода кривой, причем в случае, когда для двух смежных слоев $\rho_{i+1} < \rho_i$, на кривой будет формироваться ниспадающая ветвь, а в случае $\rho_{i+1} > \rho_i$ – восходящая.

На рис. 3,1 в качестве примера приведена кривая частотного зондирования по горизонтальной составляющей поля E_x , содержащая все вышеуказанные элементы. Она имеет левую асимпту – горизонтальную прямую, соответствующую удельному сопротивлению верхнего слоя разреза (участок кривой 0–1). Восходящий участок кривой 1–2 указывает на наличие в разрезе второго слоя более высокого сопротивления. Затем в разрезе содержится третий слой пониженного сопротивления, которому соответствует падающая ветвь (участок кривой 2–3). Четвертый слой более высокого сопротивления формирует вторую восходящую ветвь и второй максимум кривой (участок 3–4), а пятый слой – ниспадающий участок кривой 4–5, переходящий в правую горизонтальную асимпту 5–6. Таким обра-

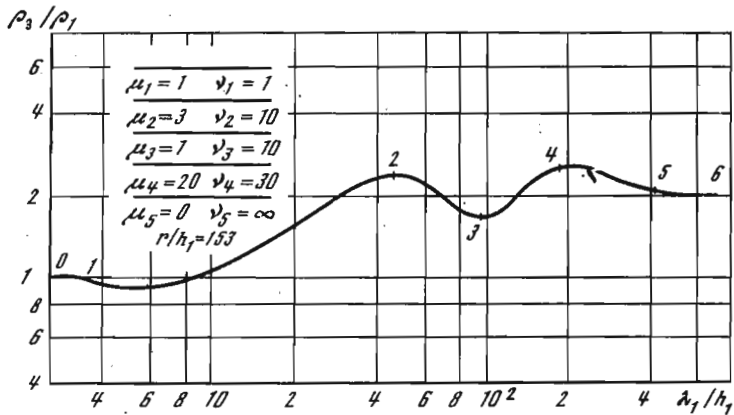


Рис. 3.1. Пятислойная теоретическая кривая ЧЗ типа КНК

зом, рассматриваемая кривая качественно соответствует пятислойному разрезу типа КНК.

В зависимости от типа геоэлектрического разреза и величины разности линейных размеров различных элементов и радиусы кривизны экстремумов кривых могут изменяться в широких пределах, хотя в ряде случаев эти признаки могут оказаться и малохарактерными. Последние, в частности, будут иметь место, когда в разрезе мощность какого-либо слоя будет мала по сравнению с мощностями верхнего или смежного слоев разреза, охватываемого зондированием, а его удельное сопротивление будет незначительно отличаться от сопротивления смежных слоев.

Таким образом, в самом общем случае можно считать, что в методе частотных зондирований, так же как и в методе ВЭЗ, изменение кажущегося сопротивления следует за ходом изменения удельного сопротивления разреза по глубине. Однако это соответствие может нарушаться вследствие наличия на частотных кривых интерференционных экстремумов. Последние особенно ярко проявляются на кривых электрического поля при наличии в разрезе непроводящей прослойки, а также на кривых магнитного поля для разрезов типа А и Q, содержащих смежные слои соответственно с последовательно повышающимся или понижающимся сопротивлением.

Как было показано в гл. I, в случае наличия в разрезе слоя-изолятора кривые электрического поля не имеют ярко выраженного максимума, который отражал бы непроводящий слой. Характерным для этих кривых является узкий глубокий минимум в высокочастотной области. Появление интерференционных экстремумов на частотных кривых имеет также место при зондировании двухслойных разрезов типа $\rho_2 > \rho_1$, когда участок кривой от левой ветви до минимума нельзя отождествлять с наличием в разрезе непроводящего слоя. Характерные минимумы имеют и трехслойные кривые $\bar{\rho}_M$ и $\bar{\rho}_Q$ типа А в высокочастотной области, вызываемые наличием в разрезе вто-

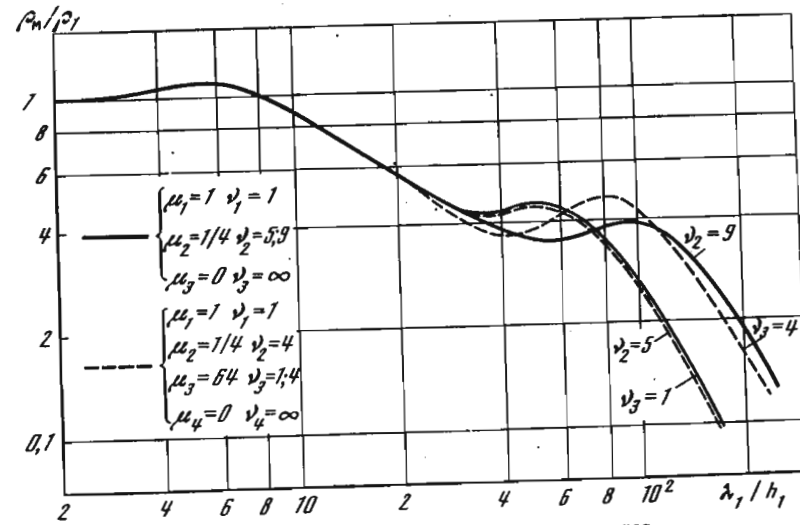


Рис. 3.2. Теоретические кривые ЧЗ

рого слоя повышенного сопротивления и непроводящего основания. На кривых типа Q в развитой части могут появляться максимумы тоже интерференционного характера.

На рис. 3.2 приведены кривые для двух разрезов, рассчитанные при $r/H = \infty$: один разрез является четырехслойным с высокоомным слоем, имеющим параметры $\mu_3 = 64$, $\nu_3 = 1$ или $\nu_3 = 4$. Этот высокоомный слой на кривой отмечается наличием восходящей ветви и максимума.

Второй разрез не содержит высокоомного слоя, однако кривые этого разреза также имеют особенности интерференционного характера, обусловленные наличием смежных слоев с резко понижающимся сопротивлением.

Поэтому качественный анализ кривых частотного зондирования по восходящим и нисходящим ветвям можно уверенно проводить лишь в тех случаях, когда протяженность этих ветвей соответствует более широкому интервалу длин волн, чем область интерференционного максимума или минимума. Кроме того, соответствие между ходом изменения удельного и кажущегося сопротивлений нарушается низкочастотной асимптотикой кривых. Так, кривые магнитного поля даже в случае непроводящего основания имеют ниспадающую правую асимптоту, а кривые электрического поля выходят на горизонтальную асимптоту и в случае проводящего основания. При этом на характерные особенности строения частотных кривых существенное влияние, кроме параметров разреза, оказывает также величина разности.

Мы уже отмечали, что различают несколько основных типов геоэлектрических разрезов: двухслойные, трехслойные и четырехслойные. Реальные геоэлектрические структуры, как правило, содержат значи-

тельное количество слоев, большинство которых имеет сравнительно небольшие мощности. При зондировании таких разрезов в результате осреднения мощностей и сопротивлений маломощных, но не высокочастотных слоев регистрируются кривые, соответствующие более простому усредненному строению разреза. Это обстоятельство дает возможность при проведении интерпретации осреднять близкие по значению параметры разреза (его смежных слоев) и представлять его в виде одного слоя, обладающего соответствующими параметрами.

Другая общая закономерность строения кривых ЧЗ состоит в том, что кривая, соответствующая определенному типу разреза при выбранном разносе, полностью регистрируется в определенном и ограниченном диапазоне частот или абсолютных λ и относительных λ_1/h_1 значениях длин волн в верхнем слое разреза, имеющем мощность h_1 . При этом наиболее характерные области кривых, отражающие закономерности строения исследуемого разреза, будут располагаться соответственно в определенных участках частотного диапазона, используемого при зондировании.

На первом этапе интерпретации определение типа разреза связано с необходимостью выделения характерных признаков строения кривых. Для осуществления второго этапа интерпретации — определения параметров разреза — используются как непосредственно палетки, так и количественные закономерности строения кривых различных типов, установленные в ходе изучения строения теоретических кривых. По соображениям удобства изложения в дальнейшем будем считать, что анализируемые кривые записаны при оптимальных разносах $r/h_1 = 3+5$, при которых основные характерные признаки строения кривых уже выявляются достаточно определенно.

Используемые в настоящее время для анализа приемы интерпретации кривых условно подразделяются на:

- а) палеточные, при которых параметры разреза определяются путем наилучшего совмещения экспериментальных кривых с теоретическими, выбранными из альбома палеток;
- б) графические, основанные на использовании графиков и номограмм;

в) аналитические, при которых применяются эмпирические формулы, представляющие собой зависимости координат особых точек кривой от параметров разреза.

Аналитические выражения, графики и номограммы получают на основе изучения закономерностей строения теоретических кривых. Отметим, что формулы, необходимые для проведения аналитической интерпретации, резко усложняются при увеличении числа слоев в разрезе, вследствие чего их целесообразно использовать при интерпретации двуслойных и трехслойных кривых. Для интерпретации многослойных кривых предпочтительнее использование палеточного и графического методов. Тем не менее в ряде случаев многослойные разрезы могут быть представлены в виде эквивалентных двуслойных и трехслойных разрезов или проинтерпретированы по частям. В послед-

нем случае приемы аналитической интерпретации могут быть применены достаточно эффективно.

Подчеркнем, что для получения более уверенных результатов, а также с целью более детального изучения разрезов необходимо проводить совместную интерпретацию кривых, записанных для различных компонент поля, а в особых случаях — и на различных разносах. Велика желательна также возможность осуществления эффективного контроля за результатами интерпретации путем расчета на ЭВМ геологических кривых для разрезов, параметры которых определены в результате интерпретации.

ПАЛЕТОЧНАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ

Интерпретация кривых частотного зондирования с помощью палеток проводится по тому же принципу, что и кривых постоянного тона, т.е. путем подбора теоретической кривой, с которой наилучшим образом совмещается экспериментальная кривая. При этом желательно, чтобы экспериментальная кривая была записана по возможности полностью, включая левую и правую асимптотические ветви. После совмещения теоретической и экспериментальной кривых определяется прежде всего мощность h_1 и удельное сопротивление ρ_1 первого слоя разреза. Значение удельного сопротивления верхнего слоя снимается с левой горизонтальной асимптоты экспериментальной кривой, поскольку эта асимптота у теоретических кривых соответствует значению $\rho_\omega/\rho_1 = 1$, где ρ_ω — величина кажущегося сопротивления, определяемого по левой асимптоте экспериментальной кривой. Значение мощности верхнего слоя h_1 определяется по правым ветвям теоретических кривых, оцифрованных значениями r/h_1 , где r — величина разноса.

Значения мощностей и удельных сопротивлений остальных слоев разреза определяются по относительным параметрам разреза — индексам палетки $\nu_i = h_i/h_1$ и $\mu_i = \rho_i/\rho_1$, для которых рассчитана теоретическая кривая, выбранная для интерпретации.

Мощность верхнего слоя можно определить также и другим способом, сопоставляя значения λ_1/h_1 в какой-либо характерной или нехарактерной точке теоретической кривой со значением частоты в соответствующей точке на экспериментальной кривой. Так, для двуслойных кривых типа $\rho_2 = \infty$ удобно использовать область значений $\lambda_1/h_1 = 4-5$, в которой расположены минимумы кривых; для двуслойных кривых типа $\rho_2 \ll \rho_1$, H и Q — вертикальную ось палетки. Тогда

$$h_1 = \frac{10^3 \sqrt{10\rho_1}}{a} \frac{1}{\sqrt{f}} \quad [\text{м}], \quad (3.1)$$

где $a = \lambda_1/h_1$.

Таким образом, в методе частотного зондирования имеется принципиальная возможность определения двумя независимыми способами

мощности и удельного сопротивления первого слоя геоэлектрического разреза, что позволяет, как мы уже отмечали в гл. II, не только осуществлять эффективный контроль за правильностью определения величин h_1 и ρ_1 , но и проводить интерпретацию кривых, записанные не полностью, о чем мы будем говорить более подробно ниже. В ходе дальнейшей интерпретации после определения мощностей и удельных сопротивлений отдельных слоев находится их суммарная мощность до опорного горизонта зондирования H и среднее продольное сопротивление разреза

$$\rho_l = \frac{H}{\sum_{i=1}^n h_i / \rho_i}$$

В случае, когда подстилающее основание является изолятором, после совмещения экспериментальной и теоретических кривых можно дополнительно определить с помощью палетки значение суммарной проводимости разреза $S = H/\rho_l$. Для этого линия S , проведенная на экспериментальной кривой с помощью палетки, продолжается до пересечения с осью $\rho_\omega = 1$ Ом·м, после чего величина S определяется по формуле

$$S = 503 \frac{1}{\sqrt{f^{**}}}, \quad (3.2)$$

где $1/\sqrt{f^{**}}$ — абсцисса точки пересечения линии S с осью $\rho_\omega = 1$ Ом·м.

В ряде случаев, особенно при больших значениях $\rho_\omega = \rho_1$, точку пересечения линии S удобнее выбирать не с осью $\rho_\omega = 1$ Ом·м, а с любой из ближайших осей $\rho_\omega = 10^n$ Ом·м. Тогда формула (3.2) будет иметь вид

$$S = 503 \frac{\sqrt{10^n}}{\sqrt{f^{**}}}, \quad (3.3)$$

где $1/\sqrt{f^{**}}$ — абсцисса точки пересечения линии S с осью $\rho_\omega = 10^n$ Ом·м.

Приведем в качестве примера палеточную интерпретацию экспериментальной кривой по компоненте поля H_z , представленной на рис. 3.3. Эта кривая была получена при зондировании в Ленинградской области Геологическим институтом АН СССР. Кривая записана с разномом 1000 м. Анализируя данную кривую, заключаем, что она принадлежит к типу H . Наилучшее совпадение кривой с теоретической достигается при параметрах разреза $\nu_1 = 1$, $\mu_1 = 1$, $\nu_2 = 2$, $\mu_2 = 1/8$, $\mu_3 = \infty$, $\nu_3 = \infty$ и величине разности $r/h_1 = 16$. Следовательно, значение мощности верхнего слоя будет равно 62,5 м, а удельное сопротивление, определенное по левой асимптоте кривой, — 300 Ом·м. Величину h_1 можно найти другим путем. Для этого определим положение точки пересечения вертикальной оси палетки с абс-

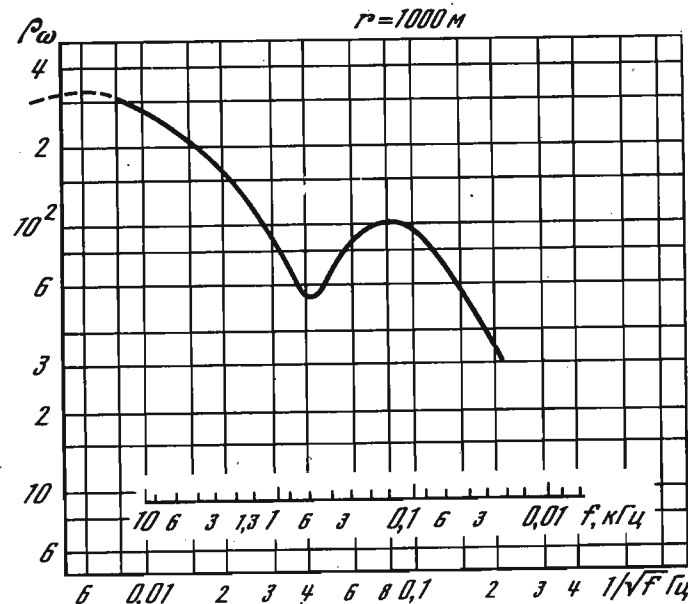


Рис. 3.3. Экспериментальная трехслойная кривая ЧЗ типа H

циссой $\lambda_1/h_1 = 8$ на оси частот экспериментальной кривой. Будем иметь (Энштейн, 1966а)

$$h_1 = \frac{\sqrt{10^7 \cdot 300}}{8} 0,009 \approx 62 \text{ м.}$$

Величины h_2 и ρ_2 по индексам палетки находятся равными 124 м и 37,5 Ом·м. Таким образом, в результате осреднения полученных данных определяется следующее геоэлектрическое строение в пункте исследования:

$$h_1 = 62 \text{ м, } \rho_1 = 300 \text{ Ом·м,}$$

$$h_2 = 124 \text{ м, } \rho_2 = 37,5 \text{ Ом·м,}$$

$$h_1 + h_2 = 186 \text{ м, } \rho_l = 52,9 \text{ Ом·м,}$$

а величина $S = 3,5$ мО.

ГРАФИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ

Графическая интерпретация частотных кривых проводится с помощью графиков и номограмм, связывающих координаты характерных точек кривых с параметрами геоэлектрического разреза и разномом. Для построения номограммы требуется проведение большого объема

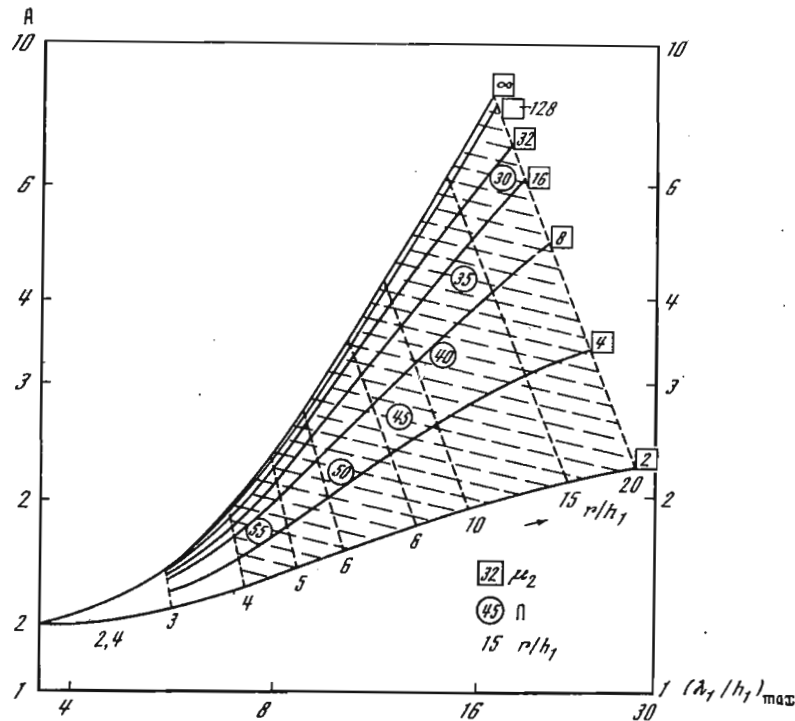


Рис. 3.4. Номограмма для интерпретации двуслойных кривых ЧЗ по составляющей поля H_z при различных значениях μ_2

расчетов на ЭВМ теоретических кривых (Ваньян и др., 1963, 1964; Тихонов и др., 1967, 1968а,б,в, 1973; Тихонов, Шахсуваров, 1956) с целью выявления закономерностей, связывающих искомые величины. В настоящее время составлено большое количество номограмм, получивших практическое применение. В качестве примера ограничимся приведением номограмм только для трех случаев, соответствующих двуслойному разрезу при $\mu_2 > 1$ для компоненты поля H_z , трехслойному разрезу для компоненты поля E_x , содержащему промежуточный слой высокого сопротивления, и трехслойному разрезу типа N для обеих компонент поля. Выбор этих примеров обусловлен следующими соображениями. Во-первых, двуслойные и трехслойные структуры типа N весьма распространены. К ним также могут быть сведены некоторые более сложные многослойные разрезы. Что же касается разрезов, содержащих промежуточные изолирующие пласты, то они являются основными структурами, для определения строения которых наиболее целесообразно применять частотные зондирования.

На рис. 3.4 приведена номограмма для интерпретации двуслойных кривых по компоненте поля H_z (Шевнин, 1973). В качестве

интерпретационного параметра выбрана точка максимума кривой, поскольку значение кажущегося сопротивления в окрестности этой точки достаточно устойчиво к воздействию различных искажающих влияний и является самой уверенно регистрируемой частью кривой при наибольшем уровне измеряемого сигнала. К тому же координаты этой точки зависят в основном от величины среднего продольного сопротивления разреза ρ_1 и частоты тока f .

Номограмма построена в координатах $A = (\rho_m / \rho_1)_{\max}$ и $(\lambda_1 / h_1)_{\max}$. На ней проведено три семейства изолиний: $\mu_2 = \text{const}$,

$r/h_1 = \text{const}$ и $\Pi = \text{const}$, где $\Pi = \sqrt{\frac{\rho_1}{f_{\max}}} \frac{10^5}{r}$, а f_{\max} — значение

частоты в максимуме экспериментальной кривой. Относительное сопротивление основания $\mu_2 = \rho_2 / \rho_1$ изменяется в пределах от 2 до ∞ . Значение относительного разброса r/h_1 изменяется в пределах от 2 до 20. В вспомогательный параметр Π входят величины, известные при проведении зондирования, кроме удельного сопротивления верхнего слоя разреза ρ_1 .

При использовании номограммы для интерпретации требуется предварительное знание удельного сопротивления верхнего слоя разреза. Если оно известно, то интерпретация с помощью приведенной номограммы проводится следующим образом. По экспериментально полученным данным определяются величины A и Π , которым на номограмме будет соответствовать определенная точка, положение которой в координатах μ_2 и r/h_1 определяет искомые параметры h_1 и μ_2 . В том случае, когда сопротивление основания известно, для определения мощности достаточно использовать один параметр — A или Π . При этом удобно пользоваться графической зависимостью $A = f_1(r/h_1)$ или $\Pi = f_2(r/h_1)$ (рис. 3.5). Из номограммы следует, что кривые магнитного поля при использовании для интерпретации величины ρ_{\max} имеют достаточно высокую разрешающую способность при определении глубины залегания опорного горизонта зондирования для значений величины $\mu_2 > 2$ при $r/h_1 > 2$. Что же касается определения удельного сопротивления опорного горизонта зондирования по значению величины ρ_{\max} , то разрешающая способность кривых уменьшается по мере увеличения его сопротивления. При этом определение величин $\mu_2 > 128$ практически не представляется возможным не только с помощью рассматриваемого способа, но также и другими методами.

Приведенная номограмма, рассчитанная для двуслойного разреза, может быть использована также и для приближенной интерпретации многослойных кривых, когда разрез имеет сопротивление основания $\mu_N = \rho_N / \rho_1$, где ρ_1 — среднее продольное сопротивление разреза, а ρ_N — сопротивление основания (опорного горизонта зондирования).

На рис. 3.6 приведена предложенная авторами номограмма для определения глубины залегания опорного горизонта зондирования для разрезов, эквивалентных двуслойным. По оси абсцисс в логарифмическом масштабе отложены значения частоты в минимуме акспе-

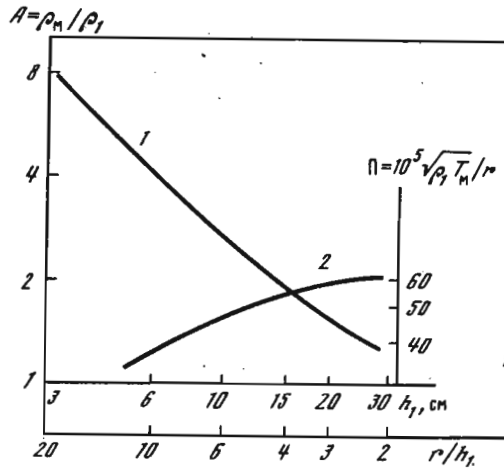
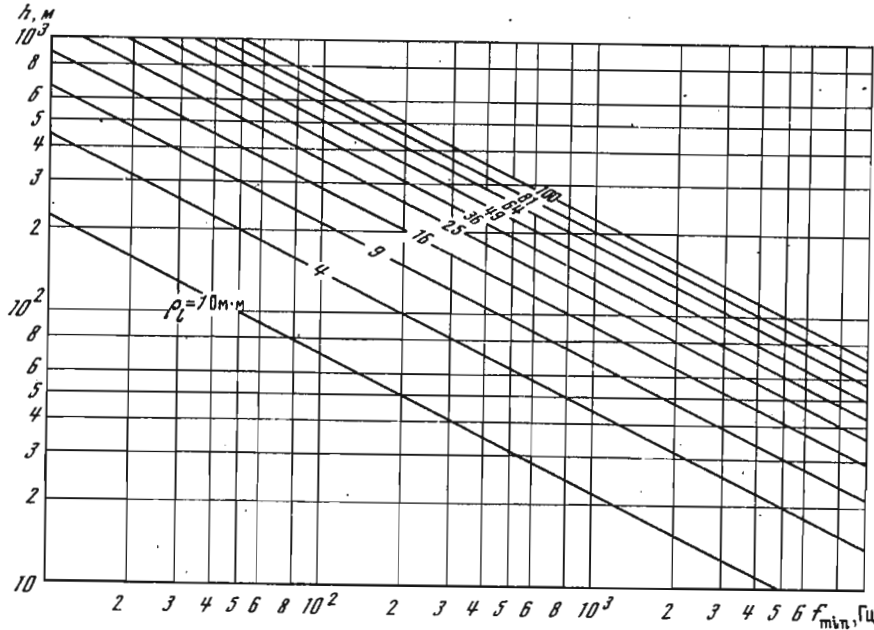


Рис. 3.5. Номограмма для интерпретации двухслойных кривых ЧЗ по параметрам А и П

Рис. 3.6. Номограмма для определения глубины залегания опорного горизонта зондирования высшего сопротивления



риментальной кривой E_x в герцах, а по оси ординат в том же масштабе — глубина залегания кровли опорного горизонта зондирования в метрах. Прямые оцифрованы значениями величин среднего продольного сопротивления разреза в ом-метрах. Эту номограмму можно использовать также для приближенных качественных оценок положения границ разделов между слоями, имеющими существенно различные сопротивления. В этих случаях вместо значения ρ_1 подставляются значения ρ_{\min} в точках перегиба на кривых. Способ использования этой номограммы не требует пояснения вследствие его простоты.

Рассмотрим более сложную номограмму. Одной из основных задач, решаемых частотными зондированиями при изучении разрезов, содержащих промежуточный слой высокого сопротивления (экран), является определение мощности экрана и глубины его погружения. Для решения этой задачи целесообразно использовать кривые кажущегося сопротивления по компоненте поля E_x , поскольку оно весьма чувствительно к наличию в разрезе даже тонкого слоя изолятора. Напротив, магнитное поле практически не отмечает в разрезе даже сравнительно мощные слабопроводящие слои.

На рис. 3.7 приведена номограмма для определения мощности и глубины залегания в разрезе слабопроводящего пласта (Скугаревская и др., 1971). Для интерпретации используется наиболее характерная точка кривой — ее минимум. Будем считать, что изолирующий слой является вторым слоем. Глубину его залегания будем характеризовать величиной $x = h_1/r$, а его мощность — отношением $y = h_2/r$, где h_1 и h_2 — соответственно мощности первого и непроводящего слоев, а r — величина разноса. Таким образом, приведенная номограмма построена для трехслойного разреза, однако она может быть использована и для интерпретации кривых, содержащих под экраном любое число слоев, поскольку сопротивление подэкранной толщи слабо влияет на строение кривой, в частности на значение ρ_3/ρ_1 в минимуме. На номограмме переменным параметром является относительная мощность изолятора $v_2 = \text{var}$. Остальные значения параметров разреза равны: $\mu_1 = 1, \nu_1 = 1, \mu_2 = \infty, \mu_3 = 1, \nu_3 = \infty$. По оси абсцисс отложены значения $(\tilde{\rho}_\omega)_{\min}$, а по оси ординат — $(h_1/r)_{\min}$. Через $(\tilde{\rho}_\omega)_{\min} = (\rho_3/\rho_1)_{\min}$ обозначено кажущееся сопротивление в минимуме кривой, а $(\lambda_1/r)_{\min} = (\lambda_1/h_1)_{\min}$, где $(\lambda_1/h_1)_{\min}$ есть значение абсциссы на палетке ρ_3/ρ_1 , при которой получается минимум кривой ρ_3/ρ_1 . Номограмма построена для значений $(\lambda_1/r)_{\min}$, а не для $(\lambda_1/h_1)_{\min}$ с тем, чтобы использовать известную из эксперимента величину разноса r . На номограмме проведены изолинии $x = \text{const}, y = \text{const}$. Если считать разнос постоянным, то перемещение по изолинии $x = \text{const}$ будет соответствовать изменению мощности слоя изолятора при неизменной глубине погружения, а при перемещении по изолинии $y = \text{const}$ будет изменяться величина h_1 , т.е. глубина погружения этого слоя при сохранении его мощности h_2 . В реальных геоэлектрических структурах относительная мощность экрана обычно изменяется в пределах $0,01 \leq v_2 \leq 50$, а разносы лежат в пределах $2 \leq r/(h_1 + h_2) \leq 10$. Поэтому величины x и y на номограмме выбраны таким образом, чтобы эти пределы соблюдались для величин v_2 и $r/(h_1 + h_2)$.

Номограмма может быть использована для интерпретации экспериментальной кривой, если известно удельное сопротивление первого слоя разреза ρ_1 . Тогда по известной величине разноса рассчитываются $(\rho_3/\rho_1)_{\min}$ и $(\lambda_1/r)_{\min}$, значения которых соответствуют точке на номограмме с координатами $x = h_1/r, y = h_2/r$, что позво-

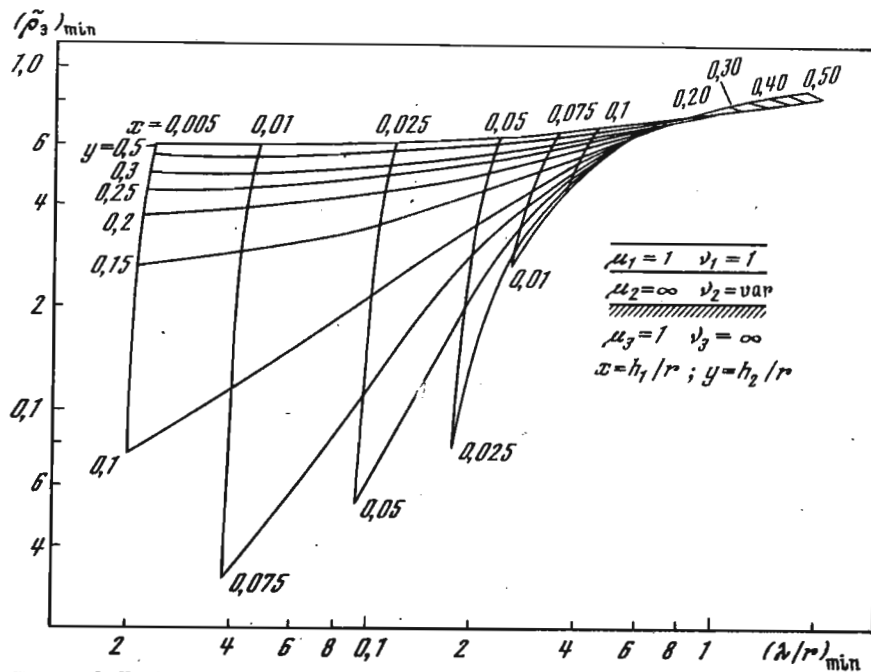


Рис. 3.7. Номограмма для определения мощности и глубины залегания промежуточного слабопроводящего пласта

ляет определить как глубину погружения изолятора $h_1 = xr$, так и его мощность $h_2 = yr$. Рассмотрение приведенной номограммы дает возможность сделать ряд выводов о разрешающей способности описанного способа определения величин h_1 и h_2 и дать рекомендации в отношении выбора величины разноса. Прежде всего отметим, что кривая имеет хорошую разрешающую способность при определении h_1 или глубины залегания экрана для любой мощности экрана независимо от величины разноса. Однако наилучшим образом будет определяться верхняя граница неглубоко погруженного экрана. Что же касается определения мощности самого экрана, то точность расчета этой величины по координатам минимума кривой ρ_3 будет зависеть от соотношений мощностей изолятора и слоя над изолятором, т.е. от значения величины ν_2 и разноса r .

Наилучшая разрешающая способность кривых ρ_3 при использовании для интерпретации параметра $(\rho_3)_{\min}$ соответствует изолиниям $x < 0,1$; $0,025 \leq y \leq 0,25$, которые выделяют на номограмме область надежного определения частотными зондированиями мощности непроводящего слоя. Номограмма показывает, что использование величины $(\rho_3)_{\min}$ позволяет хорошо выделять слои, относительная мощность которых удовлетворяет условию $\nu_2 = h_2/h_1 > 0,5$. Это означает, что может быть определена также мощность тонких слоев, если они расположены близко к земной поверхности.

Для определения величины h_2 по минимуму кривой ρ_3 можно проводить зондирования на обычных для метода частотных зондирований разносах $2 \leq r/H \leq 10$. На больших разносах будет замечнее действовать принцип эквивалентности. Если в результате зондирования получено, что $(\lambda_1/r)_{\min} > 0,5$, то определение путем расчета величины h_2 по $(\rho_3)_{\min}$ не представляется возможным. Такие неблагоприятные для интерпретации значения $(\lambda_1/r)_{\min}$ могут получаться при относительно малых разносах r/H . Однако при увеличении разноса мы легко попадаем на номограмме в область хорошего разрешения кривых ρ_3 по h_2 .

Аналогично существует верхний предел значений $(\rho_3)_{\min}$, выше которого разрешающая способность определения мала. Увеличение разноса и в этом случае позволяет перейти в область высокой разрешающей способности кривых ρ_3 .

Таким образом, кривые кажущегося сопротивления, рассчитанные по электрической составляющей поля, могут быть использованы для определения как верхней границы непроводящего слоя, расположенного внутри геоэлектрического разреза, так и его мощности. При этом верхняя граница уверенно определяется для любого экрана, а нижняя граница — для экрана, имеющего значительную по сравнению с глубиной залегания мощность ($\nu_2 > 0,5$).

При зондированиях разрезов, содержащих изолирующие пласты, значительные трудности приобретает определение величины ρ_3 в минимуме кривой, так как этой области соответствует весьма малый интервал частот и к тому же величины измеряемых в минимуме кривой сигналов резко уменьшаются. Вследствие этого зондирование разрезов, включающих непроводящий слой, с помощью электрической составляющей поля следует проводить в области высоких частот по возможности с малым шагом изменения частоты. Поэтому в таких случаях, особенно при определении параметров неглубоко залегающих изоляторов, целесообразно использовать методику непрерывных частотных зондирований.

Для разрезов типа H может быть построен ряд номограмм; некоторые из них приведены на рис. 3.8–3.10 (Иванов, 1975). При построении номограмм рис. 3.8, а, б в качестве основного параметра выбраны значения координат в точках минимума кривых ρ_M/ρ_1 и ρ_3/ρ_1 , рассчитанных для бесконечного разноса. По оси абсцисс отложены значения $(\lambda_1/h_1)_{\min}$, а по оси ординат — значения $(\rho_M)_{\min}$ или $(\rho_3)_{\min}$. За начало отсчета принята точка пересечения левой ветви кривой с осью ρ_1 . Координата этой точки равна $\lambda_1/h_1 = 8$. На номограмме проведены изолинии $\mu_2 = \rho_2/\rho_1 = \text{const}$ (сплошные линии) и $\nu_2 = h_2/h_1 = \text{const}$ (штриховые линии). Номограммы построены в линейном масштабе.

Поскольку номограмма характеризует особенности строения кривых для бесконечного разноса, при переходе к конечным разносам используется вспомогательный график (рис. 3.11), позволяющий определить величины поправок ΔX и ΔY для обоих компонент поля, которые необходимо вводить при определении коор-

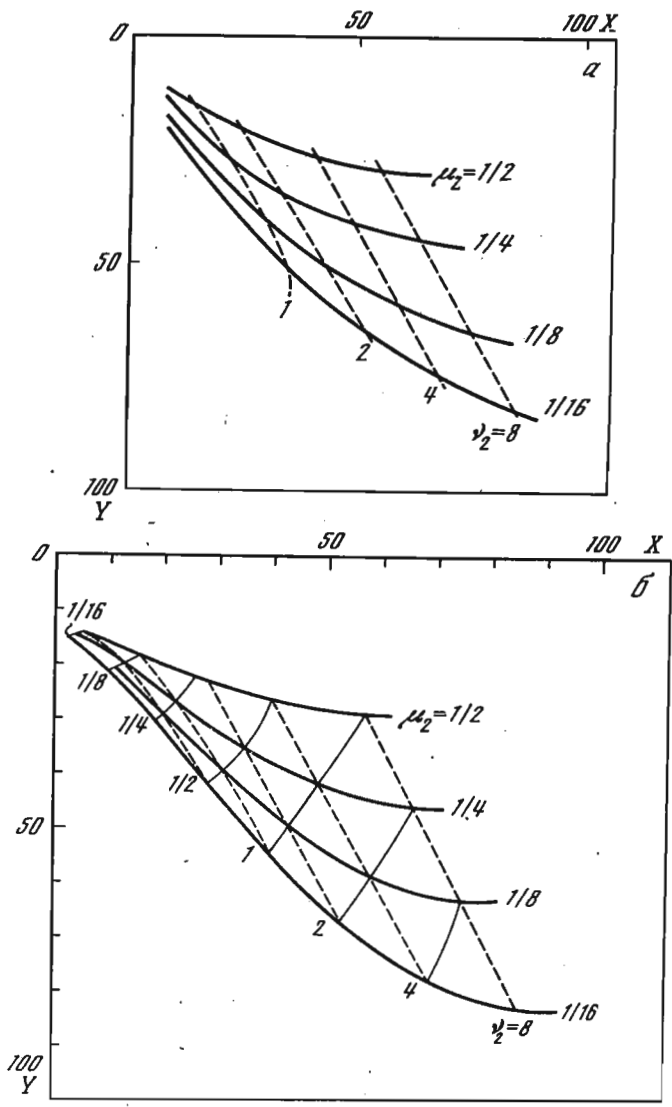


Рис. 3.8. Номограмма для интерпретации трехслойных кривых E_x (а) и H_z (б) ЧЗ типа Н

динат точки минимума кривой ρ_{\min} и $1/\sqrt{f_{\min}}$. Для этого на экспериментальной кривой типа Н, построенной в билогарифмическом масштабе с модулем 6,25 см, определяются значения координат точки минимума кривой в миллиметрах относительно точки начала отсчета, после чего по графику рис. 3.11 находят величины требуемых поправок ΔX и ΔY , которые, как правило, оказываются небольшими. По-

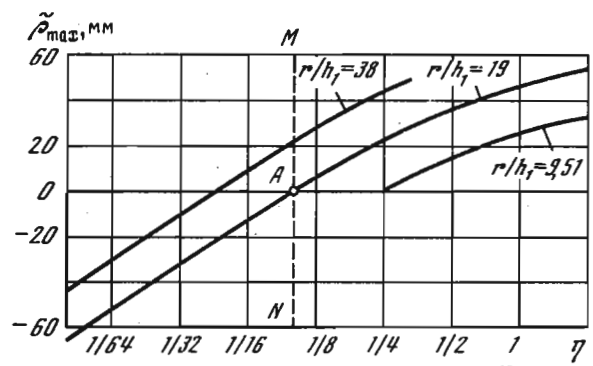


Рис. 3.9. Номограмма для определения r/h_1 трехслойных кривых ЧЗ типа Н

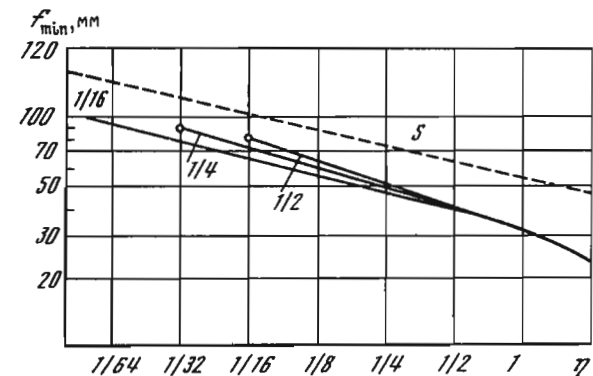


Рис. 3.10. Номограмма для определения μ_2/ν_2 трехслойных кривых ЧЗ типа Н

лученные значения $(\rho_M)_{\min}$ и $1/\sqrt{f_{\min}}$ определяют точку на номограмме, которая позволяет найти величины μ_2 и ν_2 . Поскольку величина ρ_1 известна из экспериментальной кривой, то тем самым определяются параметры второго слоя разреза.

Для вычисления мощности верхнего слоя, помимо других способов, можно, например, воспользоваться номограммой, приведенной на рис. 3.9. На этой номограмме, составленной для компоненты поля E_x , по оси абсцисс отложены значения $\eta = \mu/\nu$, а по оси ординат — величины максимумов амплитуды правых ветвей кривых, измеренные в миллиметрах относительно оси ρ_ω/ρ_1 . Кривые оцифрованы значениями r/h_1 . При интерпретации экспериментальные кривые должны быть построены в билогарифмическом масштабе с модулем 6,25 см. За "положительные" значения приняты значения амплитуд в тех случаях, когда точка максимума кривой типа Н лежит выше оси абсцисс, т.е. $\rho_{\max} > \rho_1$. За "отрицательные" — когда эта точка лежит ниже оси ρ_ω/ρ_1 , т.е. $\rho_{\max} < \rho_1$. В обоих случаях измерения значе-

ний амплитуд производят от оси абсцисс (оси ρ_ω / ρ_1). Величину h_1 можно также легко найти по формуле (3.1), полагая $a = 8$.

Из номограмм рис. 3.8, а, б следует, что параметры второго слоя разреза типа *H* будут уверенно определяться, если относительная мощность ν_2 будет больше единицы.

На рис. 3.10 приведена еще одна номограмма, иллюстрирующая зависимость величины $\eta = \mu/\nu$ от абсциссы точки f_{\min} на значение

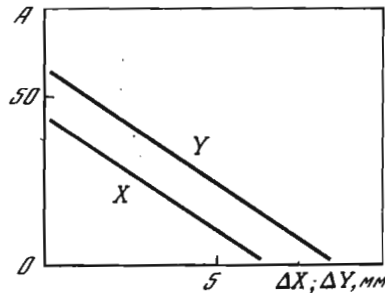


Рис. 3.11. График для определения поправок к номограммам рис. 3.8

которой слабо влияет величина μ_2 . Это обстоятельство представляет определенный интерес при интерпретации кривых. За начало отсчета принята точка на оси абсцисс с координатой $\lambda_1 / h_1 = 2$. Экспериментальная кривая должна быть построена в билогарифмическом масштабе с модулем 6,25 см. Значение абсциссы точки f_{\min} измеряется в миллиметрах.

Заметим, что одно из достоинств способа графической интерпретации заключается в том, что он позволяет оперативно определять приближенные значения параметров разреза непосредственно в процессе полевых исследований, когда применение альбома палеток большого объема затруднительно. Кроме того, номограммы дают возможность наглядно судить о разрешающей способности метода в различных геоэлектрических условиях и выбирать оптимальные величины разносов.

АНАЛИТИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ

В гл. I было показано, что математические выражения, описывающие кривые частотного зондирования, являются достаточно сложными. Это обстоятельство не дает возможности чисто аналитическим путем проследить за характером изменения строения частотных кривых в зависимости от изменения параметров геоэлектрического разреза и разноса. Поэтому на практике обычно сначала рассчитывают на ЭВМ необходимые для анализа теоретические кривые, а затем уже исследуют закономерности их строения. По результатам исследования строят графики, выражающие зависимость характерных особенностей строения кривых от параметров разреза. Далее по полученным графикам находят аналитические выражения соответствующих

им функций, которые, естественно, являются приближенными. Таким образом, как графическая, так и аналитическая интерпретация различным образом отображает только закономерности строения теоретических кривых. Заметим, что в ряде случаев приемы аналитической интерпретации оказываются весьма эффективными, особенно когда необходимо проводить интерпретацию большого количества экспериментальных кривых с помощью ЭВМ или кривых, записанных не полностью.

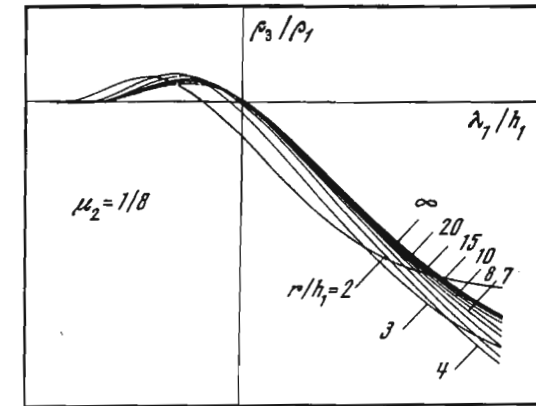


Рис. 3.12. Двуслойные теоретические кривые ЧЗ типа $\rho_2 < \rho_1$

Наиболее простые аналитические выражения получаются для двуслойных кривых. В дальнейшем будем считать экспериментальную кривую двуслойной только в случае совпадения результатов определения параметров двуслойного разреза по всем приведенным ниже основным формулам (критерий двуслойности).

На рис. 3.12 приведены двуслойные кривые типа $\rho_2 < \rho_1$, рассчитанные для различных значений r / h_1 . Отметим, что строение кривых этого типа мало зависит от величины разноса при $r / h_1 > 5$ и значения μ_2 , когда $\mu_2 < 1/8$. Наиболее характерной особенностью их строения является положение точки пересечения кривой с осью ρ_1 . Абсцисса этой точки при разносах $r / h_1 > 4$ мало отличается от значения $\lambda_1 / h_1 = 8$. Поэтому мощность первого слоя для кривых этого типа легко определяется по формуле (3.1) при $a = 8$ (Эненштейн, 1967).

Интерпретационным параметром является также зависимость угла наклона ϕ° в градусах падающей ветви кривой по отношению к оси ординат от величины μ_2 , которая при оптимальных разносах выражается следующей приближенной зависимостью:

$$\mu_2 = (\phi^\circ / 83)^4. \quad (3.4)$$

Очевидно, что формулы (3.1) и (3.4) могут быть использованы и для приближенного определения параметров первого слоя разрезов типа *H* и *Q* и удельного сопротивления второго слоя разреза.

Двуслойные кривые типа $\rho_2 = \infty$, приведенные на рис. 3.13, имеют значительно более сложное строение, зависящее от величины разности r/h_1 . В дальнейшем будем считать, что анализируемые экспериментальные кривые построены в билогарифмическом масштабе с модулем 10 см. Введем следующие обозначения: A — амплитуда правой ветви экспериментальной кривой, измеренная в сантиметрах, $(\rho_\omega/\rho_1)_{\max}$ и $(\rho_\omega/\rho_1)_{\min}$ — значения в максимуме и минимуме кривой. Кривая 1 построена для компоненты поля H_z , а кривая 2 — для компоненты поля E_x (Иванов, Круль, 1975).

Значение величины r/h_1 , например по кривым H_z , с погрешностью порядка 5% может быть определено с помощью следующих приближенных формул:

$$r/h_1 = A^{0,88} \quad \text{при } A \leq 6 \text{ см}, \quad (3.5)$$

$$r/h_1 = A/(2 - 0,12A) \quad \text{при } A > 6 \text{ см}. \quad (3.6)$$

Для кривых E_x значения величин, определенных по (3.5) и (3.6), необходимо увеличить на 15–20%.

Простая зависимость связывает значение амплитуды в точке максимума кривой ρ_{\max} с величиной r/h_1 при $\mu_2 > 32$:

$$r/h_1 = 2K\rho_{\max}/\rho_1, \quad (3.7)$$

где $K=0,9$ для кривых E_x и $K=1,1$ для кривых H_z . При $\mu_2 < 32$ значение коэффициента K для кривых E_x можно определить с помощью графиков, приведенных на рис. 3.14 (Иванов и др., 1966). Строение двуслойных кривых H_z в значительно меньшей степени зависит от величины μ_2 . Из (3.7) следует, что величина

$$S = h_1/\rho_1 = r/2K\rho_{\max}. \quad (3.8)$$

В формулы (3.5) – (3.7) не входит такой важный параметр, как значение частоты, определяющей абсциссу в экстремальных точках кривых. Можно показать, что величины r/h_1 и λ_1/h_1 в точке максимума кривой в ограниченном диапазоне оптимальных разностей связаны друг с другом следующим приближенным соотношением:

$$r/h_1 \approx [K(\lambda_1/h_1)_{\max}]^{1,88}, \quad (3.9)$$

где $K=0,31$ для кривых H_z и $K=0,175$ для кривых E_x .

Из (3.9) получаем приближенную формулу для определения мощности первого слоя h_1 в метрах или его удельного сопротивления ρ_1 в ом-метрах:

$$h_1 = C \cdot 10^6 r^{-1,25} (\rho_1/f_{\max})^{1,13}, \quad (3.10)$$

где $C=1,36$ для кривых E_x и $C=5,1$ для кривых H_z .

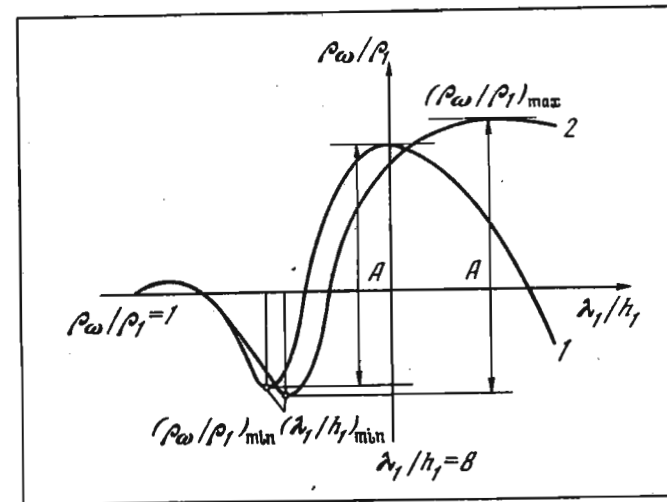


Рис. 3.13. Двуслойные теоретические кривые ЧЗ типа $\rho_2 = \infty$

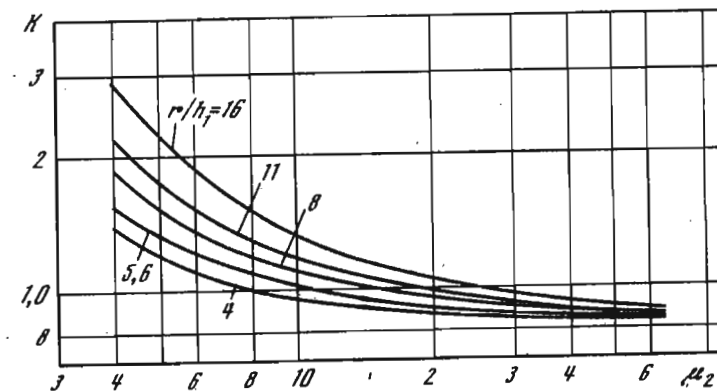


Рис. 3.14. График для определения поправочных коэффициентов к формуле (3.7)

Заметим, что определение абсциссы точки максимума экспериментальных кривых E_x всегда представляется затруднительным, что приводит к дополнительной погрешности при определении искомым величин. Поэтому для аналитической интерпретации кривых E_x целесообразнее пользоваться формулами (3.7) и (3.13).

Выражая связь между величинами r/h_1 и λ_1/h_1 с помощью линейной функции при значениях $r/h_1 > 5$, для компоненты поля H_z получим

$$h_1 = \left(2,51 \cdot 10^3 \sqrt{\rho_1} \frac{1}{\sqrt{f_{\max}}} - r \right) 0,71 \text{ [м]}. \quad (3.11)$$

Очевидно, что, подставляя значение ρ_1 , определенное из (3.7), в (3.9), можно формально получить формулу для определения величины h_1 , используя координаты только одной точки максимума правой ветви кривой. Однако такая формула не может иметь практического значения, поскольку для обеспечения определения величины с приемлемой погрешностью δ , равной, например, 3% величины r , f_{\max} и ρ_{\max} , входящие в такую формулу, должны быть определены при $\delta < 0,1\%$, недостижимой на практике даже при анализе теоретических кривых. При $\delta = 3\%$ значение h_1 будет определяться уже с погрешностью порядка 230%.

Напротив, при оптимальных разносах ($2,5 \leq r/h_1 \leq 5,5$) по координатам точки минимума кривой с погрешностью порядка 6-7% величины h_1 и ρ_1 можно определять по формулам

$$\rho_1 = \rho_{\min} (10A - 20)^{0,15} \quad (\text{при } A > 6 \text{ см } \rho_1 \approx 1,85 \rho_{\min}); \quad (3.12)$$

$$h_1 = K \cdot 10^3 \sqrt{\rho_{\min}} \frac{1}{\sqrt{f_{\min}}} \quad (\text{при } A > 6 \text{ см } K = 0,892), \quad (3.13)$$

где $K = 1,1$ для кривых N_z и $K = 0,95$ для кривых E_x .

Необходимо подчеркнуть, что определение значений h_1 и ρ_1 по приведенным выше формулам может проводиться только при условии, что интерпретируемая кривая действительно является двуслойной или что двуслойное строение разреза установлено по другим данным. В противном случае применение указанных выше формул может привести к недопустимо большим погрешностям при интерпретации.

О ВОЗМОЖНОСТИ ИНТЕРПРЕТАЦИИ КРИВЫХ, ЗАПИСАННЫХ НЕ ПОЛНОСТЬЮ

В гл. II было показано, что для записи полной кривой ЧЗ необходим определенный диапазон рабочих частот. В реальных геоэлектрических условиях величина мощности первого слоя h_1 может изменяться в самых широких пределах от единиц метров до нескольких километров, а значение удельного сопротивления этого слоя — от единиц до многих тысяч ом-метров. В связи с этим диапазон частот, требующийся для зондирования реальных геологических структур, должен охватывать огромную область частот от единиц мегагерц до десятых и даже сотых долей герца. На практике частотный диапазон аппаратуры не превышает трех-четырех порядков. Поэтому в целом ряде случаев кривые ЧЗ записываются не полностью, причем при зондированиях высокоомных разрезов регистрируются только правые ветви кривых, а при зондировании низкоомных — только левые.

Как уже отмечалось ранее, наличие области минимума на кривых ЧЗ свидетельствует либо о наличии в разрезе слоя повышенного сопротивления и конечной мощности, либо о наличии опорного горизонта зондирования — слоя высокого сопротивления и большой

по сравнению с разносом мощностью, в качестве которого наиболее часто выступает кристаллический фундамент. Таким образом, область минимума делит кривую на две части: левую и правую.

Информация, заключенная в левой ветви кривой на участке от левой горизонтальной асимптоты до минимума включительно, может быть использована для определения параметров всех слоев разреза, лежащих выше промежуточного изолирующего слоя или опорного горизонта зондирования. В ряде случаев она частично может быть использована для получения сведений о нижележащих горизонтах.

Информация, заключенная в правой ветви кривой на участке от ее минимума до правой асимптоты, может быть использована для определения мощности первого слоя разреза, среднего продольного сопротивления опорного горизонта зондирования и сопротивления подкранной толщи.

При определении параметров разреза с помощью кривых, записанных не полностью, может быть целиком или частично утрачена возможность определения тех его характеристик, информация о которых содержалась в отсутствующей части кривой. Однако в целом ряде случаев этого не происходит и неполные кривые могут быть все же успешно проинтерпретированы по частям, особенно если мы будем располагать сведениями о типе геоэлектрического разреза в пункте зондирования, например по данным электрического каротажа скважин в этом районе.

Это оказывается возможным потому, что обе части кривых взаимно дополняют друг друга и несут некоторую одинаковую информацию об одних и тех же параметрах разреза. Поясним сказанное примером. Рассмотрим строение двуслойной кривой типа $\rho_2 = \infty$. Основные параметры этого разреза h_1 и ρ_1 могут быть определены (см. предыдущий раздел) как по левой части кривой, так и по правой ветви, причем независимо друг от друга. Однако необходимо подчеркнуть, что определение этих параметров по неполным кривым будет правомерным только в том случае, если нам будет достоверно известно, что строение разреза в данном пункте исследования близко к двуслойному. В других случаях, например в кривых типа N , основным интерпретационным параметром также является величина h_1 , если значение ρ_1 известно. Другие параметры трехслойного разреза легко определяются при этом каким-либо способом. Однако информация о величине мощности первого слоя в кривых типа N заключена также и в правой ветви и может быть определена по индексу r/h_1 , указанному на палетке, или описанным выше иным способом. Таким образом, если нам наперед известно, что в пункте зондирования строение геоэлектрического разреза близко к типу N , а величина удельного сопротивления опорного горизонта зондирования существенно больше величины среднего продольного сопротивления разреза, то использование для интерпретации правых ветвей кривых не вызывается необходимостью. Здесь мы еще раз хотим обратить внимание на то обстоятельство, что необходимая информа-

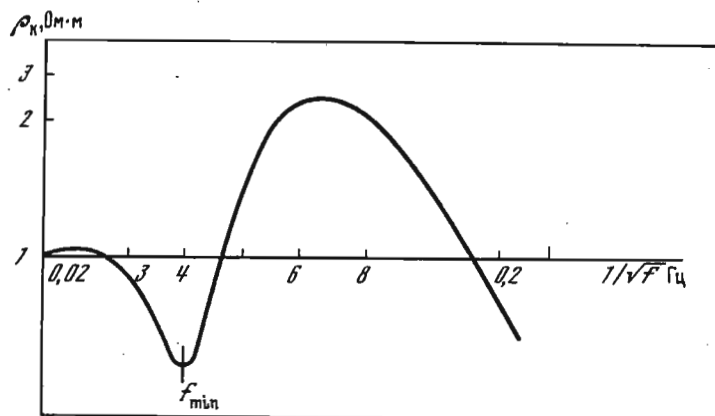


Рис. 3.15. Экспериментальная двуслойная кривая ЧЗ

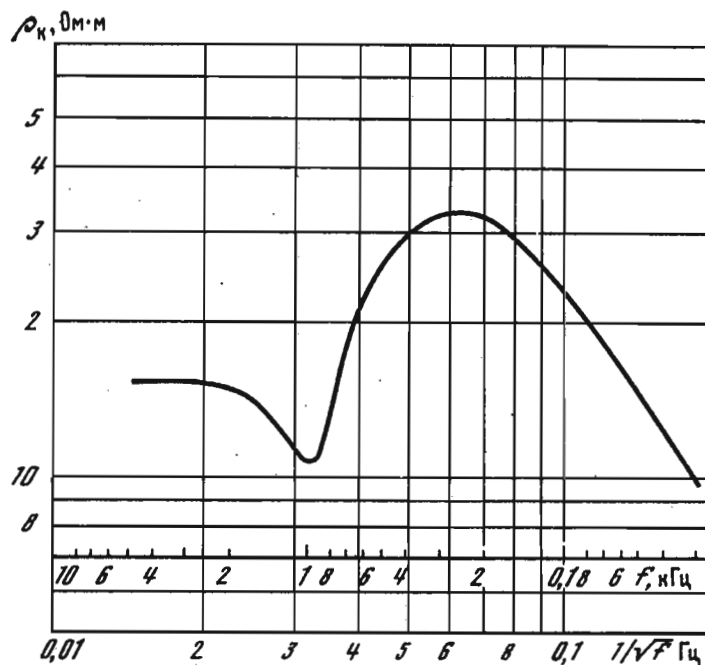


Рис. 3.16. Экспериментальная кривая ЧЗ

ция о типе разреза и сопротивлении опорного горизонта зондирования как раз и заключена в правой ветви кривой.

По мере усложнения типа разреза для целей интерпретации возрастает роль левой ветви кривой, несущей информацию о сложном строении надпорной толщи, и уменьшается роль правой ветви — носителя информации об осредненных характеристиках разреза.

В сложных геоэлектрических разрезах величина h_1 обычно мала по сравнению с мощностью всей толщи и нахождение h_1 может производиться с помощью простых асимптотических формул. В этих условиях по правой ветви кривой целесообразно проводить только контрольное определение по параметру S правильности интерпретации.

Таким образом, при проведении интерпретации кривых, записанных не полностью, необходимо учитывать множество различных факторов, привлекать всесторонние данные о предполагаемом геоэлектрическом строении изучаемого разреза и проводить непрерывно на всех этапах интерпретации сопоставление получаемых результатов и имеющихся данных.

Приведем в качестве примера сопоставление результатов интерпретации кривой, приведенной на рис. 3.15, которые получены с помощью различных приемов, а затем рассмотрим примеры интерпретации кривых, записанных не полностью. По виду кривой заключаем, что она записана для компоненты поля H_z и близка по строению к двуслойной. Величина разнеса при зондировании была равна 158 м. Хотя величина удельного сопротивления первого слоя может быть легко определена по левой асимптоте кривой, с целью усложнения задачи будем считать, что в отношении точности ее определения у нас возникли сомнения, например в связи с возможным появлением систематической погрешности в работе аппаратуры.

Применим сначала палеточный способ интерпретации. С помощью двуслойной палетки для компоненты поля H_z при $\mu_2 = \infty$ получим значение $r/h_1 = 5$ и, следовательно, величину $h_1 = 31,6$ м. Для определения величины ρ_1 найдем на палетке значение λ_1/h_1 в точке минимума кривой, равное $a = \lambda_1/h_1 = 4$. Значение частоты f_{\min} из экспериментальной кривой определим равным 625 Гц. Из (3.1) имеем

$$\rho_1 = a^2 \cdot 10^7 h_1^2 f_{\min} = 1 \text{ Ом} \cdot \text{м}.$$

Поскольку величина ρ_1 по экспериментальной кривой также определена равной 1 Ом·м, мы делаем заключение, что в процессе регистрации кривой погрешностей в работе аппаратуры не было.

Воспользуемся для интерпретации этой кривой другим способом. Найдем величину r/h_1 из (3.5) и (3.7):

$$r/h_1 = A^{0,88} = 6,12^{0,88} = 4,92,$$

$$r/h_1 = 2K \frac{\rho_{\max}}{\rho_1} = 2,2 \cdot 2,28 = 5,02.$$

Среднее значение величины r/h_1 из двух определений будет равно 4,97, и, следовательно, величина $h_1 = 31,8$ м. Величину ρ_1 определим с помощью (3.11) равной 0,99 Ом·м. Поскольку результаты нахождения значений h_1 и ρ_1 , проведенные различными способами, практически совпали, то данная кривая действительно является двуслойной.

Будем постепенно усложнять задачу. Проведем интерпретацию кривой, приведенной на рис. 3.16. Сопоставление данной кривой с палеткой показывает, что она несколько отличается от двуслойной. Будем также считать (с целью усложнения условий задачи), что величина разроса r при зондировании не могла быть определена с необходимой точностью. Из эксперимента найдены следующие данные, необходимые для интерпретации: $\rho_1 = 15,5 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $\rho_{\min} = 10,6 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $\rho_{\max} = 34 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $1/\sqrt{f_{\min}} = 0,032$, $f_{\max} = 260,2 \text{ Гц}$. Амплитуда правой ветви кривой равна 5 см. Продолжим линию $\rho_1 = 15,5 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ до пересечения с правой ниспадающей ветвью кривой в точке $1/\sqrt{f_H} = 0,125$ ($f_H = 64 \text{ Гц}$). Из (2.7) имеем

$$r = \sqrt{8 \cdot 10^5 \rho_1} \frac{1}{\sqrt{f_H}} = 440,2 \text{ м.}$$

Величина r/h_1 , определенная по палетке, равна 4,15 (следовательно, $h_1 = 106 \text{ м}$). Найдем эту величину по (3.5) и (3.7):

$$\frac{r}{h_1} = A^{0,88} = 4,12, \quad h_1 = 106,8 \text{ м};$$

$$\frac{r}{h_1} = 2K \rho_{\max}/\rho_1 = 4,82, \quad h_1 = 91,3 \text{ м.}$$

Среднее значение h_1 из трех определений будет равно 101,4 м. Величину ρ_1 найдем из (3.12):

$$\rho_1 = 17,6 \text{ Ом}\cdot\text{м.}$$

Расхождение в определениях величины r/h_1 по (3.7) и (3.5) объясняется тем, что данная кривая по своему строению не является двуслойной, а только близка к ней.

Определим далее величину ρ_1 с помощью палетки. Для этого найдем значение $(\lambda_1/h_1)_{\min} = a = 3,6$ и $f_{\min} = 976,6 \text{ Гц}$. Тогда из (3.1) имеем

$$\rho_1 = a^2 \cdot 10^7 h_1^2 f_{\min} = 13 \text{ Ом}\cdot\text{м.}$$

Наложением кривой на палетку определим значение ρ_1 для двуслойной кривой, равное 18 Ом·м. Среднее значение ρ_1 из трех определений будет равно 15,9 Ом·м, что близко к величине $\rho_1 = 15,5 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ найденной из кривой. Таким образом, приближенные значения параметров разреза, определенные в ходе интерпретации, будут равны:

$$h_1 = 101,5 \text{ м}, \quad \rho_1 = 15,9 \text{ Ом}\cdot\text{м.}$$

Используем приведенные выше приемы для интерпретации некоторых кривых, записанных не полностью. Отметим, что поскольку

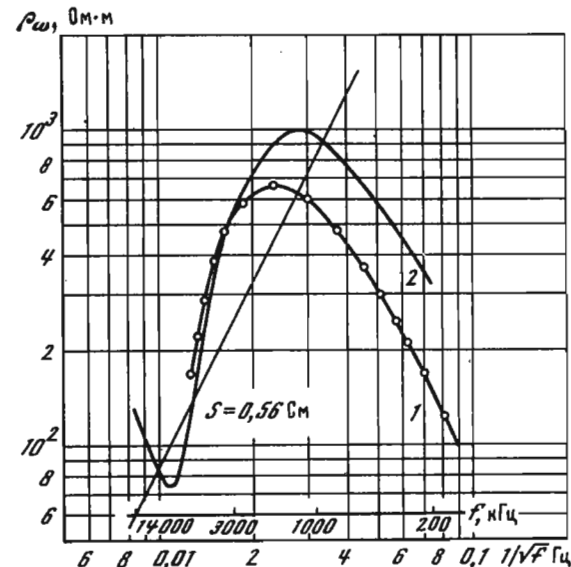


Рис. 3.17. Экспериментальная кривая 43, записанная не полностью

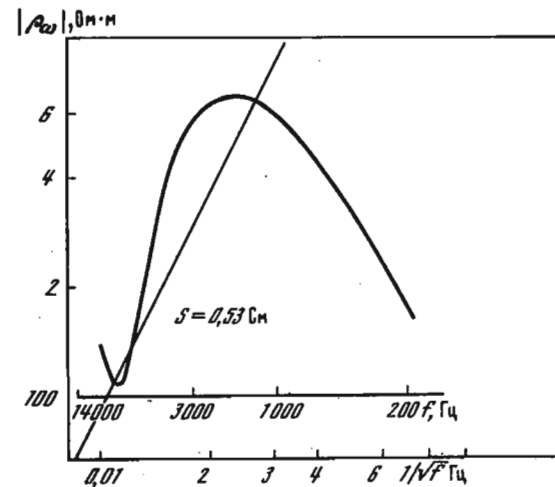


Рис. 3.18. Правая ветвь экспериментальной кривой H_z

у данных кривых правая ветвь зарегистрирована, включая область минимума, то они также могут быть проинтерпретированы и с помощью палеток.

На рис. 3.17 представлены кривые частотного зондирования по составляющей поля H_z , полученные в пределах Украинского кри-

талического щита. Они записаны при $r=900$ м (кривая 1) и $r=1500$ м (кривая 2). Согласно имеющимся данным о геологическом строении разреза в районе зондирования, геоэлектрическую структуру здесь можно рассматривать как двуслойную, в которой мощность рыхлых отложений, перекрывающих породы фундамента, не превышает 100 м, а в пункте зондирования равна 85 м. Из (3.6) или другим путем для двух разностей получим среднее значение $h_1=86$ м. Значение величины ρ_1 , вычисленное по (3.12) или определенное по палетке, равно 140 Ом·м.

На рис. 3.18 приведена кривая, полученная в Воронежской области при $r=800$ м. Величина A по кривой определяется равной 7,7 см. Следовательно, по (3.6) $r/h_1=7,16$ и $h_1=112$ м.

Рассмотрим более сложный случай. Проведем интерпретацию неполной кривой E_x , у которой была зарегистрирована только одна правая ветвь (рис. 3.19). Будем считать, что данная асимптотическая ветвь принадлежит двуслойной кривой при $\mu_2=\infty$. Проведем сначала линию ρ_1 на произвольном уровне, равном, например, 1,2 Ом·м, и с помощью палетки определим величину $r/h_1=4$ и $h_{1,1}=39,5$ м. Найдем эту величину другим путем. Для этого на той же палетке определим величину $\lambda_1/h_1=4,18$ в точке минимума кривой, выбранной для $r/h_1=4$. Тогда получим

$$h_{1,2} = \frac{\sqrt{10^7 \rho_1}}{4,18} \frac{1}{\sqrt{t_{\min}}} = 34,6 \text{ м.}$$

Расхождение между двумя значениями $h_{1,1}$ и $h_{1,2}$, определенными различными способами, свидетельствует о том, что величина $\rho_1=1,2$ Ом·м была выбрана неправильно и к тому же с избытком, поскольку $h_{1,1} > h_{1,2}$.

Выберем второе произвольное значение ρ_1 , равное, например, 0,86 Ом·м, и снова проведем определение $h_{1,1}$ и $h_{1,2}$. При $\rho_1=0,86$ Ом·м величина $r/h_1=6$, а значения $h_{1,1}$ и $h_{1,2}$ будут соответственно равны 26,4 и 29,3 м. Неравенство $h_{1,1} < h_{1,2}$ свидетельствует о том, что величина $\rho_1=0,86$ Ом·м в ходе интерпретации была снова выбрана неверно и с недостатком. Для определения истинного значения h_1 и ρ_1 отложим на графике в логарифмическом масштабе по оси абсцисс значения $\rho_1=0,86$ и 1,2 Ом·м, а по оси ординат — величины $h_{1,1}$ и $h_{1,2}$ и соединим их попарно прямыми линиями (рис. 3.20).

Из графика видно, что обе прямые пересекаются в точке с абсциссой $\rho_1=1$ Ом·м и ординатой, равной 31,6 м, которые и являются искомыми параметрами разреза. Полная кривая построена по палетке пунктиром (см. рис. 3.19).

На рис. 3.21 приведена неполная правая ветвь кривой E_x типа K , записанная в районе г.Винницы с разностью $r=25$ км (кривая 2). Кривая 1 получена в этом же районе с разностью 41,5 км, а кривая 3 — с разностью 35 км. Для определения параметров верхних

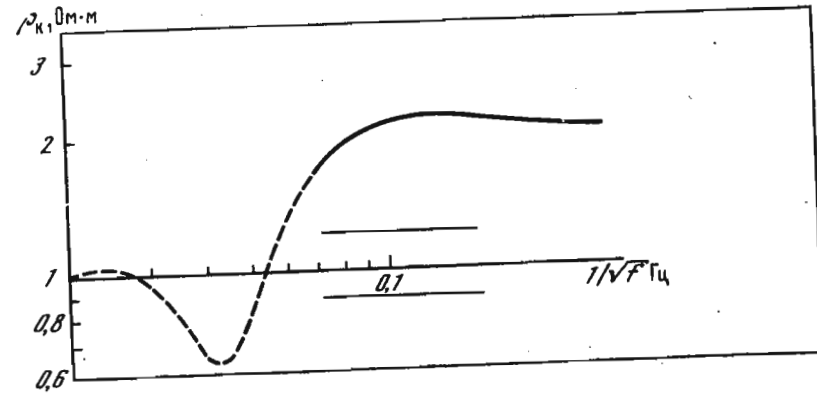


Рис. 3.19. Правая ветвь экспериментальной кривой E_x

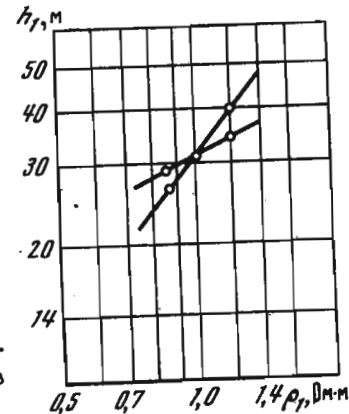
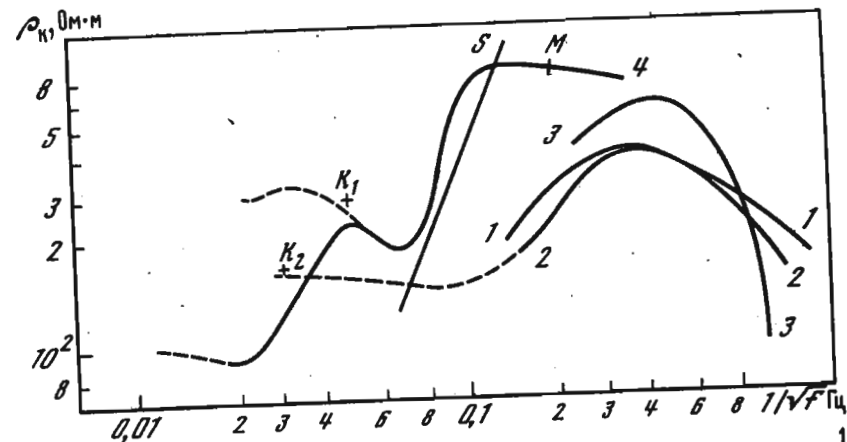


Рис. 3.20. Вспомогательный график для интерпретации кривых ЧЗ

Рис. 3.21. Различные типы экспериментальных кривых, записанных в Винницкой области



слоев геоэлектрического разреза в центре установки $AB-MN$ было проведено дополнительное зондирование с малым разносом $r = 4,5 \text{ км}$, в результате которого получена четырехслойная кривая типа KH (кривая 4). Интерпретация этой кривой в случае отсутствия подходящей палетки типа KH может быть проведена с помощью трехслойной палетки типа H . Для этого сначала определяются параметры верхних слоев разреза: $h_1 = 103 \text{ м}$, $\rho_1 = 100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ и $h_2 = 220 \text{ м}$, $\rho_2 = 3000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$. Таким образом, суммарная мощность двух первых слоев разреза $h_{1,2}$ будет равна 325 м , а среднее продольное сопротивление — $295 \text{ Ом}\cdot\text{м}$. Примем эти величины в качестве характеристик верхнего слоя разреза, эквивалентного первым двум. По формуле (3.1) вычислим абсциссу "креста" палетки типа H ($K_1 = 1/\sqrt{f} = 0,048$). Далее с помощью трехслойной палетки типа H определим мощность и удельное сопротивление третьего слоя, которые будут равны 180 м и $62 \text{ Ом}\cdot\text{м}$. Следовательно, суммарная мощность трех первых слоев разреза $h_{1,2,3}$ будет равна 505 м , а их среднее продольное сопротивление — $168,3 \text{ Ом}\cdot\text{м}$. При этом величина S будет равна $3,0$. Для контроля за правильностью определения параметров верхних слоев разреза найдем величину S по формулам (3.3) и (3.8), которая будет соответственно равна $3,03$ и $3,00$. Полученные данные о величине S совпадают друг с другом и могут быть использованы для интерпретации кривой 2, которую проведем следующим образом. Вычислим абсциссу "креста" K_2 трехслойной палетки типа K в точке $\lambda_1/h_1 = 3$ и совместим его с экспериментальной кривой 2. После этого с помощью трехслойной палетки типа K легко определяется мощность четвертого слоя $h_4 = 4000 \text{ м}$ и его удельное сопротивление — $637 \text{ Ом}\cdot\text{м}$. Удельное сопротивление пятого слоя найдено равным $5,3 \text{ Ом}\cdot\text{м}$. Мощность пятого слоя по данной кривой определена быть не может вследствие отсутствия у нее правой горизонтальной асимптоты.

Отметим, что в ряде случаев возможна приближенная качественная интерпретация даже сильно искаженных кривых, записанных к тому же не полностью. В качестве примера на рис. 3.22 приведены кривые 43 по компонентам поля H_z и E_x , записанные в южной части Эстонской ССР, близ пос. Кьнну. По своему строению кривая H_z близка к кривым, полученным при моделировании 43 вблизи края выклинивающегося экрана (см. гл. II). Очевидно, что количественная интерпретация данной кривой весьма сложна и требует наличия большого количества специальных кривых частотного моделирования. Однако с помощью номограммы рис. 3.6 можно все же сделать попытку качественного определения основных параметров разреза. Первый минимум кривой имеет координаты $\rho_{\min} = 1500 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ и $f_{\min} = 3700 \text{ Гц}$. Следовательно, глубина залегания кровли промежуточного слоя высокого сопротивления ориентировочно будет равна $140-150 \text{ м}$. Второй минимум кривой имеет координаты $\rho_{\min} = 95 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ и $f_{\min} = 250 \text{ Гц}$. Следовательно, глубина залегания опорного горизонта зондирования (фундамента) в этом случае будет равна $420-430 \text{ м}$. Скважина, имеющаяся в этом районе, вскрыла фунда-

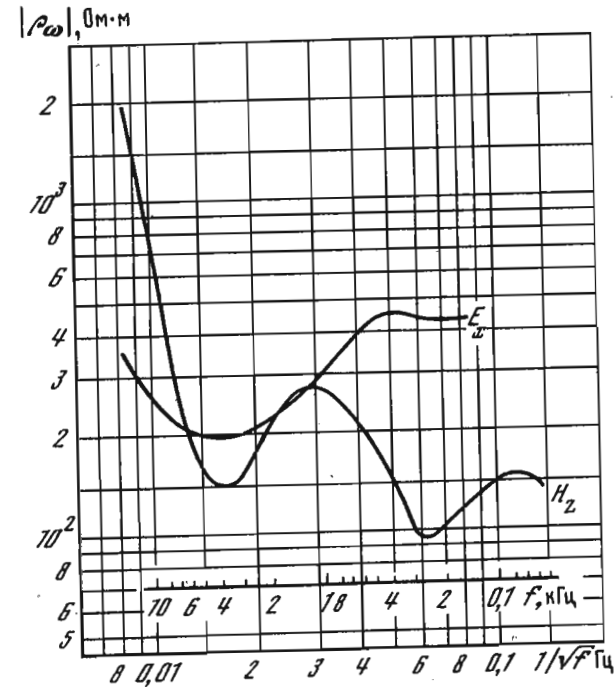


Рис. 3.22. Экспериментальная кривая 43 сложного геоэлектрического разреза

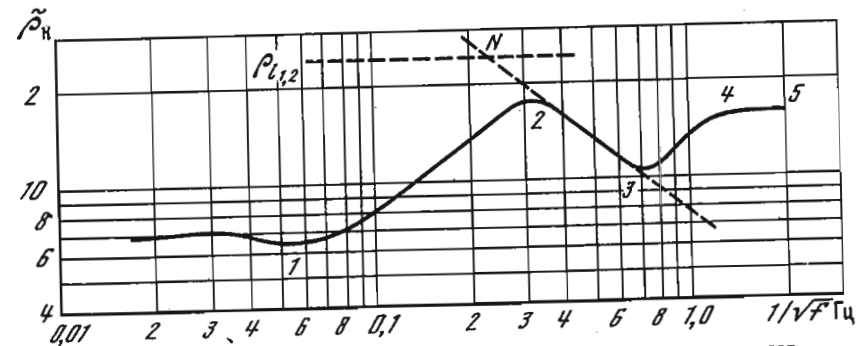


Рис. 3.23. Четырехслойная экспериментальная кривая 43

мент на глубине 420 м , а кровлю экрана — на глубине 200 м (см. рис. 4.7).

В заключение в качестве примера проведем приближенную интерпретацию кривой, имеющей сложное строение. На рис. 3.23 приведена кривая 43 по компоненте поля E_x , полученная в Актюбинской области Казахской ССР. Кривая записана с разносом $r = 5000 \text{ м}$. Параметры первого слоя и удельное сопротивление второго слоя мо-

гут быть определены с помощью палетки $\rho_2 \gg \rho_1$, рассчитанной для волновой зоны, поскольку мощность первого слоя много меньше величины разности: $h_1 = 83,5$ м, $\rho_1 = 7$ Ом·м и $\rho_2 = 42$ Ом·м. Мощность второго слоя с помощью палетки типа К находится равной $6h_1 = 501$ м. Суммарная мощность двух первых слоев разреза будет равна 585 м, а среднее продольное сопротивление — 24,5 Ом·м. Проведем далее горизонтальную прямую, пересекающую ось ординат в точке 24,5 Ом·м, и продолжим до пересечения с ней участок кривой между точками 2 и 3. Тогда точка пересечения этих прямых с абсциссой $1/\sqrt{f} = 0,22$ будет соответствовать точке $\lambda_1/h_1 = 8$ теоретической кривой, описывающей эквивалентный по продольной проводимости S трехслойный разрез типа Н. Мощность первого слоя $h_{1,2}$ эквивалентного разреза может быть определена двумя способами: по координатам "креста" палетки с помощью (3.1) или по палетке типа Н с индексами 1/4 — 2 — ∞ при $r/h_1 = 9$.

В первом случае

$$h_{1,2} = \frac{\sqrt{10^7 \rho_{1,2}}}{8} \frac{1}{\sqrt{f}} = 435 \text{ м};$$

во втором $h_{1,2} = 560$ м, а суммарная мощность всех слоев разреза — 1700 м. Заметим, что определение значения $h_{1,2}$ описанным способом может быть проведено с погрешностью порядка —12%. Поэтому значение $h_{1,2} = h_1 + h_2$, определенное равным 435 м, должно быть соответственно увеличено до 480–520 м.

Таким образом, мощность первого и второго слоев, определенная различными способами, в среднем можно принять равной 560 м. Поскольку общая мощность всех слоев разреза по палетке типа Н определяется равной 1700 м, то мощность третьего слоя примем равной 1140 м, а его удельное сопротивление — 7–8 Ом·м.

На основании полученных данных среднее продольное сопротивление всех слоев разреза определяется равным 9,75 Ом·м. Близкое к этому значение ρ_l может быть также найдено по значению ρ_{\min} в точке 3 минимума кривой.

По правой ветви кривой можно двумя независимыми способами определить величину S . С помощью палетки она находится равной 176, по формуле (3.8) — 167, а по результатам интерпретации — 174,4. Таким образом, среднее значение S будет равно 172,5. Следовательно, мощность осадочной толщи будет близка к 1700 м. Приведенные выше примеры позволяют судить только о некоторых приемах интерпретации частотных кривых, которые в совокупности не представляют собой единой методики интерпретации, но при использовании в ограниченных рамках могут давать полезные сведения о строении геоэлектрического разреза.

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ, ПРОВЕДЕННЫХ МЕТОДОМ ЧАСТОТНЫХ ЗОНДИРОВАНИЙ

К настоящему времени методом частотных электромагнитных зондирований в Советском Союзе проведен большой объем экспериментальных исследований. Этот метод начинают использовать и в ряде зарубежных стран, например во Франции, Венгрии и др.

Особенно эффективным он оказался при изучении строения геологических структур, содержащих непроницаемые слои, а также при исследовании внутреннего строения кристаллического фундамента.

Остановимся на результатах некоторых исследований, проведенных Геологическим институтом АН СССР при участии авторов в Воронежской области, Эстонской ССР, Украинской ССР, Кольском полуострове и Южном Урале. Основная задача исследований в Воронежской области состояла в определении удельного сопротивления кровли фундамента, в Эстонской ССР — в изучении строения осадочного чехла, содержащего пласты высокого сопротивления, в Украинской ССР и на Кольском полуострове — в исследовании внутреннего строения фундамента, на Южном Урале — в изучении строения сложных геологических структур.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОЩНОСТИ ОСАДОЧНОГО ЧЕХЛА И УДЕЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ КРОВЛИ ФУНДАМЕНТА

Для проведения исследований в Воронежской области был выбран Петровский интрузивный массив, находящийся в Павловском районе. Глубина залегания фундамента здесь изменяется в пределах от 50 до 200 м и более, величины удельных сопротивлений горных пород — от 2–5 до 2000 Ом·м и более. Величины разностей выбирались в пределах от 500 до 800 м, длины линий АВ — от 100 до 200 м, линий MN — 50 м, а площадь приемной рамки — 2500 м². Измерения проводились аппаратурой для среднеглубинных частотных зондирований в диапазоне частот от 20 Гц до 10 кГц.

Величины измеряемых сигналов изменялись в пределах от 10 до 500 мкВ/А.

На рис. 4.1 приведена кривая ЧЗ по составляющей поля E_x , полученная в этом районе близ скв. 406а. По своему строению кривая близка к двуслойной и полностью совмещается с теоретической кривой, рассчитанной для $\mu_2 = \infty$ при $r/h_1 = 5,6$. При зондировании

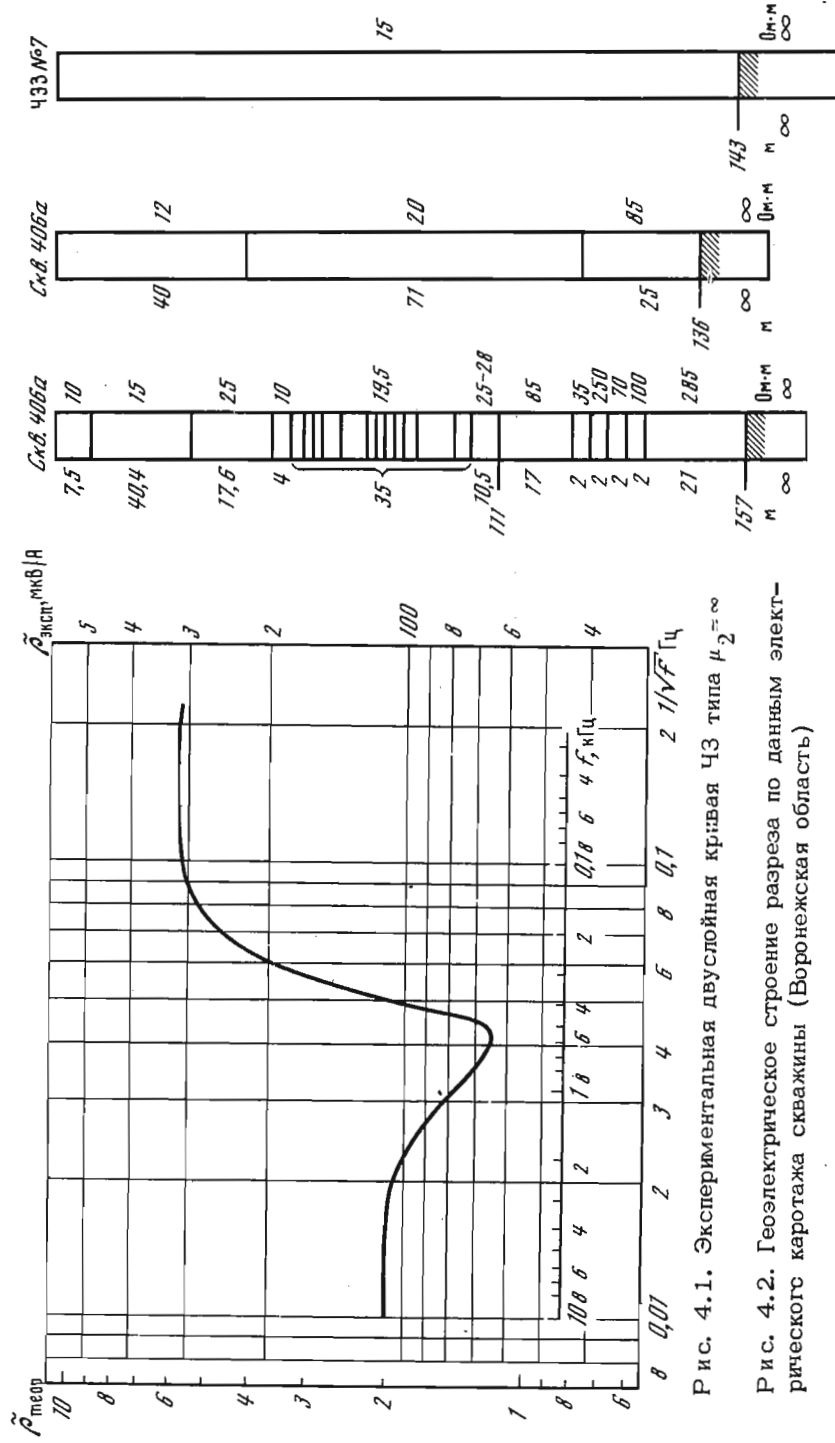


Рис. 4.1. Экспериментальная двуслойная кривая ЧЗ типа $\mu_2 = \infty$

Рис. 4.2. Геоэлектрическое строение разреза по данным электрического каротажа скважины (Воронежская область)

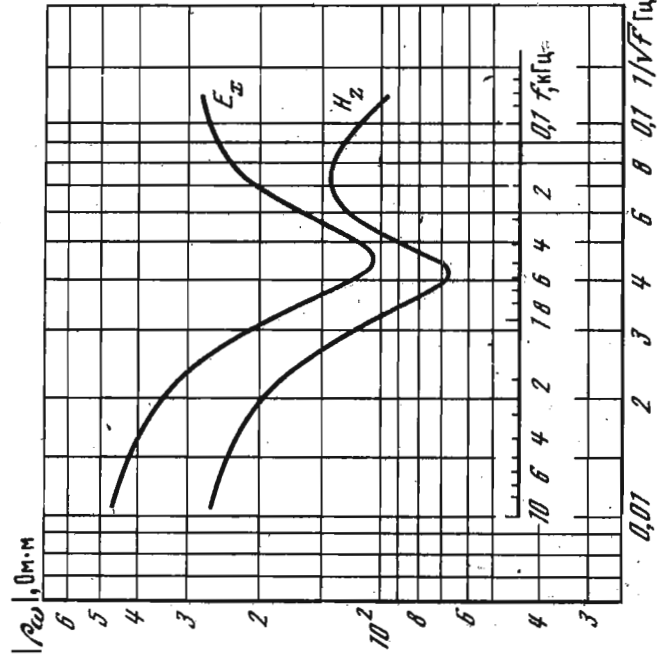


Рис. 4.3. Экспериментальная четырехслойная кривая ЧЗ типа ЧА

Рис. 4.4. Геоэлектрическое строение разреза по данным электрического каротажа скважины (Эстонская ССР).

величина разноса $r = 800$ м; следовательно, мощность осадочной толщи, определенная с помощью палетки, будет равна 143 м.

На рис. 4.2 приведено геоэлектрическое строение разреза в пункте исследования по данным электрического каротажа скв. 406а (левая колонка) и обобщенный геоэлектрический разрез (средняя колонка). Результаты интерпретации кривой приведены на правой колонке. По данным электрического каротажа геоэлектрический разрез имеет сложное строение. Мощность верхних слоев разреза около 40 м и среднее сопротивление — около 12 Ом·м. Ниже в разрезе залегает большая пачка тонких слоев, имеющих практически одинаковые значения удельных сопротивлений — от 20 до 28 Ом·м. Мощность этой пачки равна около 70 м, а среднее сопротивление — около 20 Ом·м. Далее в разрезе содержится слой мощностью около 25 м и сопротивлением порядка 85 Ом·м. Кровля кристаллического фундамента вскрыта скважиной на глубине 136 м и оказалась раздробленной до глубины 157 м.

Поскольку удельные сопротивления первого, второго и третьего слоев практически мало отличаются друг от друга и близки к сопротивлению пачки нижележащих слоев, то на кривой ЧЗ эти слои проявляются как один слой. Что же касается нижнего слоя повышенного сопротивления, то его мощность, равная 17 м, значительно меньше четверти длины волны в первом и втором осредненных слоях ($\rho_1 = 15$ Ом·м, $f_{\min} = 550$ Гц), которая равна около 500 м, и поэтому на кривой он оказался слабо выраженным. Таким образом, хотя геоэлектрический разрез в пункте исследования и относится к типу А, практически его можно считать двуслойным.

В результате интерпретации этой кривой способами, приведенными в гл. III, получаются близкие значения величины глубины залегания кровли фундамента, равные 142–145 м и соответствующие среднему значению глубины залегания раздробленной кровли фундамента.

На рис. 4.3 приведены экспериментальные кривые частотного зондирования по E_x и H_z , полученные в центральной части Эстонской ССР близ скважины Кейла с разносом 1000 м. На рис. 4.4 показано геоэлектрическое строение разреза по данным электрического каротажа скважины Кейла (левая колонка). На правой колонке — обобщенный геоэлектрический разрез. В результате интерпретации этой кривой, проведенной с помощью четырехслойной теоретической кривой типа АА с параметрами $1/8 - 1 - 1 - 1/2 - \infty$ и $r/h_1 = 12$, определяются следующие характеристики разреза: $h_1 = 84$ м, $\rho_1 = 230$ Ом·м, $h_2 = 84$ м, $\rho_2 = 290$ Ом·м, $h_3 = 43$ м, $\rho_3 = 230$ Ом·м, $h_4 = \infty$, $\rho_4 = \infty$. И в этом случае интерпретации частотной кривой хорошо совпадают с данными о геологическом строении разреза в пункте зондирования.

На рис. 4.5, а представлена кривая ЧЗ по составляющей поля E_x , полученная также в Павловском районе Воронежской области. По

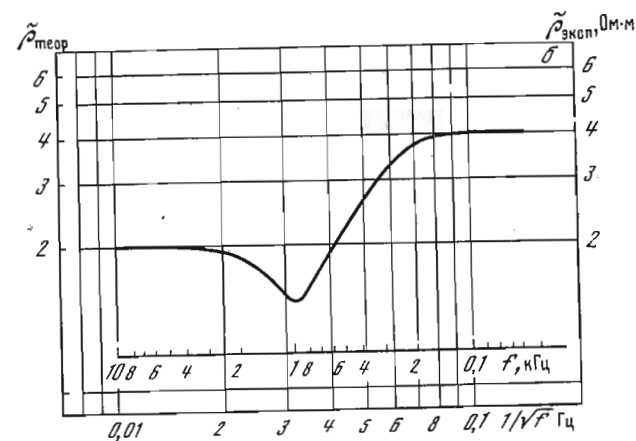
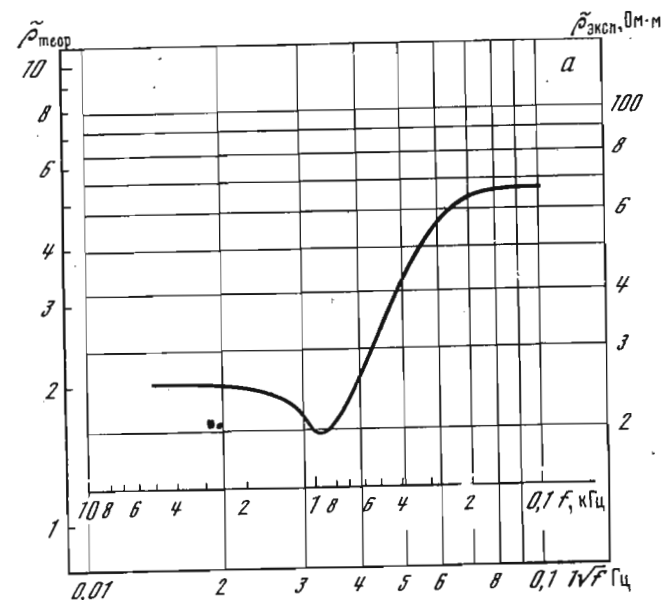


Рис. 4.5. Экспериментальная кривая ЧЗ при $\mu_2 = 6$ (а) и $\mu_2 = 4$ (б)

своему строению эта кривая близка к двуслойной и хорошо совмещается с теоретической, рассчитанной для значения $\mu_2 = 6$ и $r/h_1 = 6,8$. При зондировании величина r была равна 500 м; следовательно, мощность осадочного комплекса в этом пункте определяется равной 74 м, удельное сопротивление верхнего слоя (по левой ветви кривой) — 12,5 Ом·м, а сопротивление фундамента — 75 Ом·м.

Другая кривая, приведенная на рис. 4.5, б, получена также в этом районе. По своему строению она подобна кривой рис. 4.5, а, но отличается от нее более пологой восходящей правой ветвью, что свидетельствует о еще меньшем значении величины μ_2 . Эта кривая практически совмещается с двуслойной теоретической кривой, рассчитанной для значения $\mu_2 = 4$ и $r/h_1 = 7$. Величина r при зондировании была равна 500 м; следовательно, мощность осадочной толщи определяется равной 72 м, удельное сопротивление первого слоя — 15,6 Ом·м, а сопротивление фундамента — 62 Ом·м.

Необходимо отметить, что кривые, близкие по строению к приведенным на рис. 4.5, как было показано в гл. II, могут быть получены также и при зондировании в условиях, характеризующихся негоризонтальным залеганием кровли опорного горизонта зондирования. Поэтому в данном случае были проведены встречные зондирования, показавшие наличие горизонтально-слоистой структуры разреза.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ РАЗРЕЗОВ, СОДЕРЖАЩИХ ВЫСОКООМНЫЕ ПЛАСТЫ

Приведенные выше кривые были получены в условиях, когда геоэлектрический разрез имел сравнительно однородное строение и не содержал промежуточных пластов высокого сопротивления. Между тем геоэлектрические структуры, содержащие промежуточные пласты высокого сопротивления, широко развиты на территории СССР, в частности на территории Эстонской ССР. Геологическое строение Эстонской ССР до постановки исследований методом ЧЗ было известно на основании данных электрического каротажа отдельных скважин, поскольку зондирования на постоянном токе, проведенные в этом районе, не дали положительных результатов.

При зондировании поле возбуждалось заземленным электрическим диполем длиной от 200 до 500 м. Величины разносов изменялись от 800 до 1600 м. Для приема электрической составляющей поля использовался заземленный электрический диполь длиной от 15 до 50 м. Площадь приемной рамки была равна 5000 м². Зондирования были проведены в 40 пунктах по трем профилям общей протяженностью 120 км, проходившим в широтном и меридиональном направлениях в центральной и южной частях Эстонской ССР.

Как показали зондирования, для исследованной территории характерны два типа разрезов: *НА* и *КН*. Результаты совместной интерпретации частотных кривых, полученных при зондировании в меридиональном направлении, представлены на рис. 4.6. На этом участке профиля протяженностью 75 км, проходившем в направлении от г. Кейла к пос. Кынну, было проведено 20 зондирований, по результатам интерпретации которых построена модель геоэлектрического разреза, позволяющая сделать следующие выводы. Кровля кристал-

лического фундамента на протяжении всего профиля монотонно погружается в южном направлении. Глубина залегания кровли фундамента при этом изменяется от 215 м близ г. Кейла до 430 м близ пос. Кынну. На участке между зондированиями № 6 и 10 отмечается локальное поднятие фундамента с амплитудой около 50 м. В осадочном чехле частотными зондированиями выделяется несколько слоев, соответствующих определенным литолого-стратиграфическим горизонтам. Залегание выделенных слоев подчиняется падению кровли фундамента. По мере продвижения к югу профиля наблюдается увеличение мощностей и удельных сопротивлений высокоомных карбонатных пород, слагающих верхние горизонты разреза. В связи с этим среднее продольное сопротивление осадочного комплекса повышается в 1,5–2 раза. Более детальное рассмотрение разреза выявляет следующие характерные особенности его строения.

Нижняя толща разреза, представленная в основном песчано-глинистыми отложениями нижнего кембрия и венда, является низкоомной. Ее среднее продольное сопротивление изменяется от 30 до 50 Ом·м. Границы этой толщи, перекрытой мощным слоем известняков, хорошо выделяются зондированиями на протяжении всего профиля. По геологическим данным эта толща подразделяется на три слоя: верхний — мощностью от 30 до 60 м и удельным сопротивлением от 30 до 200 Ом·м, соответствующий песчанистым глинам и песчаникам нижнего кембрия и нижнего ордовика; промежуточный — мощностью 40–80 м, соответствующий глинистым отложениям нижнего кембрия и имеющий удельное сопротивление 20–25 Ом·м, и нижний — мощностью 20–50 м и удельным сопротивлением около 200 Ом·м, соответствующий песчано-глинистым отложениям венда. Границы между отдельными низкоомными толщами по зондированиям не прослеживаются.

Верхняя, высокоомная толща разреза представлена карбонатными отложениями среднего и верхнего ордовика и нижнего силура и характеризуется высокими значениями удельных сопротивлений, изменяющихся в пределах от 200 до 1000 Ом·м и более. Ее мощность изменяется от 60 до 300 м.

Верхняя толща по геологическим данным представлена четырьмя слоями. Первый (верхний) прослеживается зондированиями на южной оконечности профиля на участке между ЧЗ № 17 и 19. Его мощность изменяется от нуля до 120 м, а среднее продольное сопротивление равно около 200 Ом·м. Слой представлен главным образом доломитами с прослойками мергеля. Второй слой представлен мергелистыми известняками верхнего ордовика и нижнего силура. Его мощность изменяется от 80 до 100 м, а удельное сопротивление равно 400–500 Ом·м. Выходы слоя на дневную поверхность прослеживаются на участке между ЧЗ № 12 и 16. Третий слой имеет мощность порядка 40–50 м и удельное сопротивление от 300 до 1000 Ом·м и соответствует мергелистым известнякам верхнего ордовика. Четвертый слой высокоомной толщи мощностью порядка 60 м и удельным сопротивлением 200–1000 Ом·м соот-

ветствует карбонатным отложениям среднего ордовика, представленным чередованием мергелистых известняков и мергелей.

Удельные сопротивления второго, третьего и четвертого слоев, слагающих высокоомную толщу на различных участках профиля, практически мало отличаются друг от друга и на кривых ЧЗ; эти три слоя проявляются в виде одного мощного слоя, имеющего высокое сопротивление.

Таким образом, геоэлектрическое строение осадочного чехла на этом профиле исследования по данным ЧЗ находится в согласии с данными о геологическом строении района исследования, которые схематически приведены на рис. 4.7.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВНУТРЕННЕГО СТРОЕНИЯ ФУНДАМЕНТА

Мы уже неоднократно отмечали, что использование переменных электромагнитных полей, и в частности метода ЧЗ, открывает возможность изучения внутреннего строения такого важного объекта исследования, как кристаллический фундамент (Никитина, Эненштейн, 1968; Тихонов и др., 1967; Шахсуваров, Зверева, 1966). В настоящее время методом ЧЗ изучают внутреннее строение фундамента, начиная с глубин порядка 100 м и до 20–30 км. Проведенные в последние годы исследования на кристаллических массивах позволили в ряде случаев выявить в их глубинном строении ряд аномальных особенностей, подтвержденных глубинным бурением (Жамалетдинов и др., 1973).

В качестве одного из примеров, иллюстрирующих возможности метода при изучении внутреннего строения фундамента, рассмотрим некоторые результаты исследований, выполненных Геологическим институтом АН СССР при участии авторов в районе г. Винница Украинской ССР (Иванов и др., 1973б) и приведенных на рис. 4.8.

Для исследований использовался диапазон частот от 0,23 до 1083 Гц. Питающий диполь – линия АВ длиной 4 км – располагалась близ г. Турбова. Приемная установка располагалась к югу от линии АВ на расстоянии 41,5 км.

Вследствие малой величины сигналов, измерявшихся на больших разностях, и наличия в районе большого уровня промышленных помех были зарегистрированы только неполные кривые по составляющей поля E_x (рис. 4.8). Для определения параметров верхних слоев разреза было проведено дополнительное зондирование с разностью 4,5 км, расположенное между линией АВ и приемными диполями MN.

В результате интерпретации кривой рис. 4.8, которая относится к типу К и по своему виду является типичной кривой, полученной в этом районе, определяются следующие осредненные параметры геоэлектрического разреза: $h_1 = 500$ м, $\rho_1 = 168$ Ом·м, $h_2 = 4000$ м, $\rho_2 = 673$ Ом·м, $\rho_3 = 5,3$ Ом·м. Мощность третьего, хорошо проводящего слоя по данной кривой определена быть не может.

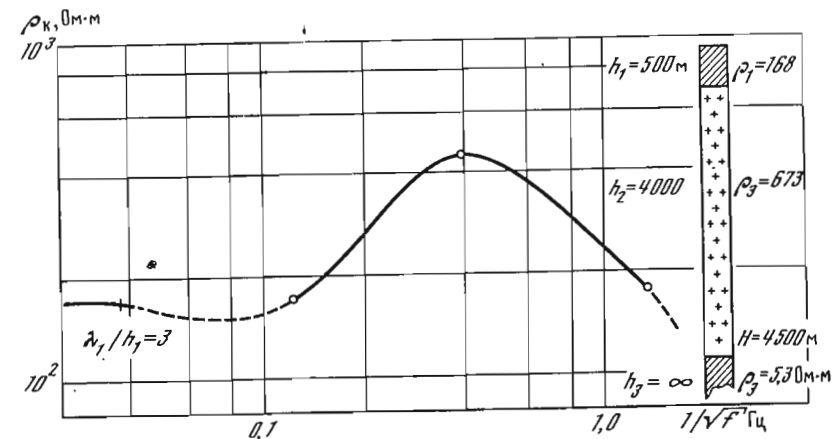


Рис. 4.8. Экспериментальная кривая ЧЗ типа К (Винницкая область)

Таким образом, в результате исследований, проведенных в Винницкой области, в фундаменте на глубине порядка 4,5 км по профилю длиной около 80 км, проходящему с севера на юг, был обнаружен хорошо проводящий слой большой мощности. В других районах этой области, а также в южных районах Житомирской области были найдены значительные участки, характеризующиеся сложным строением фундамента и наличием проводящих зон на глубинах от 600 м до 10 км. Кроме того, в этих районах было обнаружено большое количество глубинных разломов.

В настоящее время не существует единой точки зрения на физическую природу этих низкоомных образований. Возможно, это явление обусловлено действием нескольких причин: наличием в фундаменте зон с электронной проводимостью, влиянием потоков соленых вод, движущихся по глубинным разломам, наличием в фундаменте включений хорошо проводящих рудных тел и др.

Подобные проводящие зоны в фундаменте были обнаружены и при зондированиях на Кольском полуострове в районе обрамления и в центральной части Печенгской структуры, а также в районе заложения сверхглубокой скважины (Жамалетдинов и др., 1973). В геологическом строении этого района преобладающим развитием пользуются гнейсы различного состава, гранито-гнейсы и диабазы. Их сопротивление по данным параметрических ВЭЗ и электропрофилеирования достигает десятков тысяч ом-метров. Рылые моренные отложения имеют сопротивления в сотни и первые тысячи ом-метров, а их мощность составляет первые десятки метров. По частотным зондированиям мощность коры выветривания во всех пунктах определяется равной 100–150 м. Наряду с разностями пород высокого сопротивления в этом районе широко развиты электронно-проводящие образования, наличие которых хорошо отмечается частотными

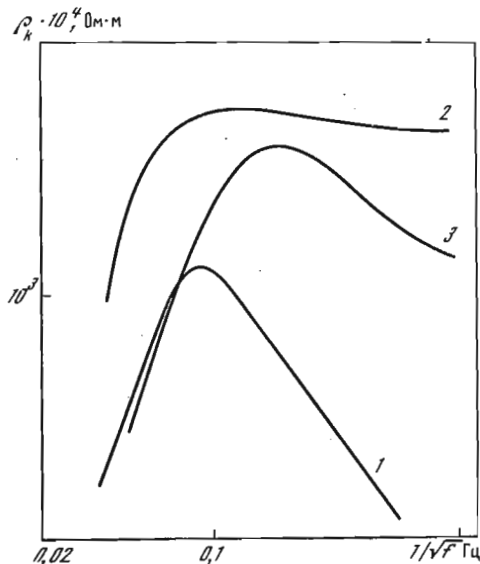


Рис. 4.9. Правые ветви экспериментальных кривых ЧЗ (Кольский полуостров)

зондированиями. Зондирования проводились в диапазоне частот от 0,25 до 1100 Гц. Поле возбуждалось заземленным электрическим диполем длиной от 1,5 до 3,6 км. Величины разросов изменялись в зависимости от сети дорог, геологической обстановки и условий УКВ радиоприема от 4 до 32 км.

На рис. 4.9 приведены некоторые характерные типы кривых ЧЗ, полученных в этом районе. Все они относятся к кривым типа К.

Кривая 1 получена близ сверхглубокой скважины с разномом 8,8 км. Ее интерпретация позволила определить глубину залегания кровли первого проводящего слоя, равную около 1500 м. Это удивительно совпадает с результатом сверхглубокого бурения, которое встретило проводящий слой (продуктивную толщу) на глубине 1450 м. Кривые 2 и 3 были получены вне пределов Печенгской структуры.

Интерпретация всех кривых, полученных в этом районе, позволяет определить мощность первого слоя разреза, по-видимому, коры выветривания, равную 100-150 м, и его удельное сопротивление - 160-300 Ом·м. Удельное сопротивление второго слоя по данным интерпретации превышает 20 000 Ом·м. Проводя формальную интерпретацию кривых как кривых типа К, можно получить данные о глубине залегания третьего, хорошо проводящего слоя: 3,0-4,5 км и более. По отдельным кривым глубина залегания слоя пониженного сопротивления определяется равной 10-13 км. Удельное сопротивление третьего слоя находится равным 5-10 Ом·м. Что же касается физической природы низкоомных образований, то, по-видимому, как это показано в ряде последних работ (Жамалетдинов, 1976), они представляют собой зоны с электронной проводимостью, которые широко распространены в районе Печенгской структуры. Частотные зондирования, проведенные на значительном удалении от этой структуры, обнаруживают некоторое понижение сопротивления на больших глубинах - от 9 до 15 км, связанное, видимо, с влиянием кровли базальтов. Этим влиянием можно также объяснить строение ряда кривых, полученных в северо-западной части Жигонирской области и других районах в пределах Украинского кристаллического щита.

ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ДАННЫХ ЧАСТОТНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЗОНДИРОВАНИЙ

В результате интерпретации кривых частотных электромагнитных зондирований получают, как и в других методах электроразведки, данные о геоэлектрическом строении изучаемого разреза. Определение на основании этих данных вещественного состава слагающих его пород представляет собой несравненно более сложную и часто неразрешимую задачу. Трудности геологической интерпретации данных частотных зондирований обусловлены тем, что на практике удельные сопротивления горных пород зависят не столько от их вещественного состава, сколько от их влагонасыщенности. Приводимые ниже табл. 4 и 5 дают некоторое представление о диапазоне изменения величин удельных сопротивлений отдельных горных пород в их естественном залегании в районах, в которых были проведены ЧЗ. Из таблиц видно, что однозначная количественная связь между величинами удельных сопротивлений и вещественным составом горных пород практически отсутствует и в большинстве случаев о тех или иных породах можно говорить только как о имеющих низкое, среднее и высокое сопротивление.

Таблица 4

Значения удельных сопротивлений (в Ом·м) некоторых горных пород в естественном залегании (Воронежская обл.)

Породы	Диапазон изменения величин сопротивлений	Наиболее часто встречающиеся значения
Графитизированные углистые кристаллические сланцы	Единицы и доли Ом·м	
Глины	2-22	10
Суглинки	5-40	10-20
Аргиллиты	8-30	10-15
Пески влажные	10-80	35-40
Мел и мергель трещиноватый и обводненный	20-50	20-30
Мел и мергель	30-300	50-100
Песчаники	50-120	50
Пески сухие	100-2500	250-400
Кристаллические сланцы	100-2000	200-500
Породы основного состава	200-2000	300-500
	и более	
Породы кислого состава	10 ³ -10 ⁵	5·10 ⁴ -10 ⁵
Диабазы	2·10 ³ -10 ⁵	

Таблица 5

Значения удельных сопротивлений (в Ом·м) некоторых горных пород в естественном залегании (Эстонская ССР)

Породы	Диапазон изменения величин сопротивлений	Наиболее часто встречающиеся значения
Доломиты	100-150	100
Известняки	40-1300	500
Мергелистые известняки	300-1300	600
Известняки с прослоями мергелей	200-1300	500
Песчаники и глины	25-50	25
Песчаники	100-160	150

Однако положение существенно меняется, если район зондирования хорошо изучен в геологическом отношении и в нем могут быть проведены определения удельного сопротивления пород в их естественном залегании путем электрического каротажа скважин или путем измерений на выходах с помощью ЧЗ на малых разносах. Приводимый ниже пример, на наш взгляд, в какой-то мере иллюстрирует возможности геологической интерпретации данных ЧЗ, полученных к тому же в достаточно сложных геологических условиях на западном склоне Южного Урала (Иванов и др., 1973а) в Актюбинской области.

В этом районе основным объектом исследования являлась территория Сакмарской зоны и Хабарнинского гипербазитового массива. Структурно-геологическими работами было установлено, что слагающие зону эвгеосинклинальные серии (O-D₂) образуют систему покровных пластин. В различных частях изученной территории число таких пластин колеблется от 4 до 10.

Стратиграфический разрез Сакмарской зоны в общем виде следующий. Древнейшими породами, по-видимому, являются серпентинизированные гипербазиты, метасоматические габбро, габбро-амфиболиты, зеленые сланцы, продукты размыва которых встречаются в диапазоне отложений ордовик-силур. Иногда гипербазиты и габбро образуют крупные, относительно слабо нарушенные массивы (Хабарнинский массив). Чаше же они встречаются на поверхности в виде протрузионных, штокообразных или пластовых тел серпентинитового меланжа, крайне неравномерно насыщающих вулканогенно-осадочную толщу.

Разрез последней (сверху вниз):

- 1) песчаники и алевролиты (O₁₋₁);
- 2) песчаники, аргиллиты (O₁₋₂);
- 3) туффиты, яшмы, диабазы, аргиллиты, альбитофиры (O₂ - S₁n₁);

4) кремни, диабазы (S₁n₁ - S₂);

5) песчаники, андезитовые и базальтовые порфириты (D₁₋₂e);

6) щелочные базальты, альбитофиры (D₂e).

Как уже отмечалось, отдельные части разреза находятся в сложных тектонических отношениях, образуя покровные пластины. Было высказано предположение, что покровы выполняют крупную синклинальную структуру, т.е. Сакмарская зона представляет собой синформу, которая подстилается песчаниками зилайрской свиты (D₃-C₁). Это подтверждается тем, что в ряде мест горными (в том числе и буровыми) работами доказано наличие в краевых частях зон вулканогенно-осадочных серий (O-D₂) на песчаники (D₃-C₁). Полоски разрывов падают во всех случаях под зону.

Исследования методом ЧЗ в южной части Сакмарской зоны проводились Геологическим институтом АН СССР при участии авторов в пос. Ленинском и на Хабарнинском массиве. В первом районе было выполнено 35 зондирований с разносами от 5 до 12 км. В большинстве пунктов были записаны кривые по обеим компонентам поля, позволяющие провести их количественную интерпретацию. Кривые, полученные при зондированиях в центральной и южной частях района исследований, описывают сложные четырехслойные и пятислойные разрезы типа КН и КНК. Поскольку ЧЗ по компоненте поля H_z в данных геологических условиях обеспечивают меньшую разрешающую способность по сравнению с зондированиями по компоненте поля E_x, основные данные о геоэлектрическом строении были получены при интерпретации электрических кривых.

С целью получения наиболее достоверной информации интерпретация кривых проводилась различными способами. Специально выполненные К.П. Королевой расчеты теоретических кривых позволили получить удовлетворительные результаты интерпретации многослойного разреза, осложненного к тому же различными тектоническими нарушениями. Необходимо отметить, что отдельные кривые, полученные в районе предполагаемых тектонических нарушений, имеют очень сложное строение и в связи с отсутствием в настоящее время возможностей расчетов необходимых теоретических кривых могли быть проинтерпретированы только качественно.

По результатам интерпретации кривых ЧЗ были сделаны выводы о геоэлектрическом строении района исследований, на основании которых построены геоэлектрические разрезы, приведенные на рис. 4.10.

Центральная часть района (рис. 4.10, б) по данным зондирований сложена пятью основными слоями, для которых характерны следующие значения мощностей h_i (в м) и удельных сопротивлений ρ_i (в Ом·м):

$$\begin{aligned}
 h_1 &= 150, & \rho_1 &= 30 \div 60; \\
 h_2 &= 300 \div 400, & \rho_2 &= 90 \div 160; \\
 h_3 &= 400 \div 500, & \rho_3 &= 5 \div 10; \\
 h_4 &= 500 \div 800, & \rho_4 &= 400 \div 1000 \\
 h_5 &= \infty, & \rho_5 &= 5.
 \end{aligned}$$

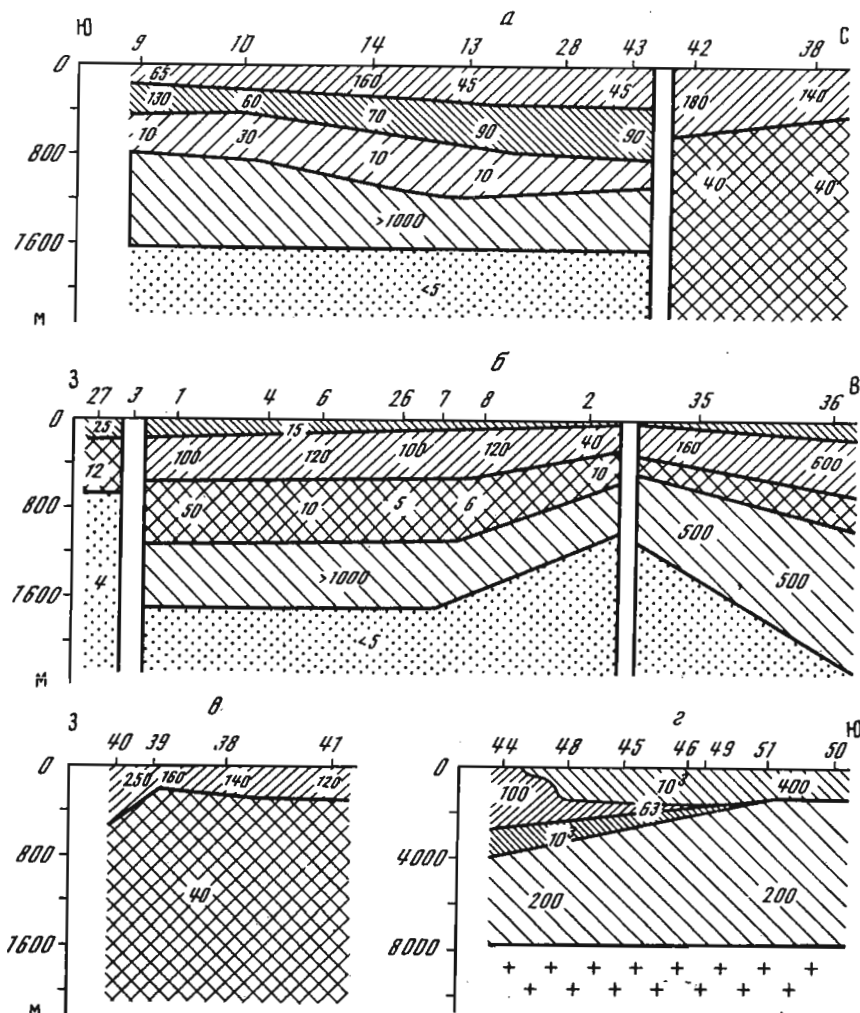


Рис. 4.10. Геоэлектрическое строение разрезов по данным ЧЗ

В восточной части, в районе пос. Ленинского, наблюдается резкое уменьшение глубины залегания опорного горизонта зондирования и мощностей вышележащих слоев. Восточнее же пос. Ленинского, напротив, прослеживается крутое падение опорного горизонта зондирования и вышележащих слоев на восток и одновременное увеличение сопротивления всех слоев разреза.

На северном участке (рис. 4.10, а, в) меридионального профиля, в районе зондирований № 42, 43, наблюдается резкое изменение геоэлектрического строения разреза: разрез типа КНК сменяется двуслойным разрезом типа $\rho_2 < \rho_1$. При этом мощность первого слоя

определяется равной 300–400 м, удельное сопротивление – 150–200 Ом·м, удельное сопротивление второго слоя – 40 Ом·м, а его мощность – более 5,5–6 км. Такое строение разреза прослеживается на всем протяжении этого профиля.

При зондированиях в западной части структуры, в районе пос. Шоншар (рис. 4.10, б), в числе других кривых, соответствующих пятислойному разрезу, записано несколько кривых, строение которых резко отличается от строения большинства других. В результате интерпретации этих кривых определяются следующие параметры разреза:

$$h_1 = 465 \pm 515, \quad \rho_1 = 18;$$

$$h_2 = 465 \pm 515, \quad \rho_2 = 220;$$

$$h_3 = 3700 \pm 4100, \quad \rho_3 = 18,$$

а по кривой ЧЭЗ № 3 и другим глубина залегания опорного горизонта зондирования определяется равной 6,2 км. Глубина опорного горизонта, равная более 3 км, определяется и при интерпретации ряда кривых, записанных в этом районе. При этом мощность верхнего слоя оказывается равной 230 м, а мощность второго слоя – 2800 м. Между тем ряд кривых, записанных в том же районе, но только с меньшим разномом ($\tau = 5$ км вместо 9,3 км и $\tau = 9,3$ км вместо 12 км), свидетельствует о совершенно ином строении геоэлектрического разреза. Это дает основание сделать вывод, что в данном районе, разделенном линией, проходящей с севера на юг через пос. Шоншар, геоэлектрическое строение разреза изменяется. Кривая № 27, полученная западнее пос. Шоншар (рис. 4.10, б), отражает резкое изменение строения геоэлектрического разреза и появление в нем хорошо проводящих горизонтов большой мощности, характерных для разрезов типа Q со следующими параметрами слоев:

$$h_1 = 200, \quad \rho_1 = 25;$$

$$h_2 = 400, \quad \rho_2 = 12;$$

$$h_3 = \infty, \quad \rho_3 = 5.$$

В пределах Хабаровинского массива было выполнено 10 зондирований по профилю длиной 25 км, пересекающему массив с севера на юг. Исследования были проведены в два этапа. На первом определялась глубина залегания фундамента. Для этой цели использовались длинные зондирования с разномсами от 8,8 до 18 км. По результатам интерпретации построены модели геоэлектрического разреза, приведенные на рис. 4.10, в. Как видно из рисунка, глубина залегания опорного горизонта зондирования (возможно, фундамента) в южной части этого профиля оказалась равной 7000–7300 м. Верхняя надпорная толща здесь имеет двуслойное строение, причем мощность и удельное сопротивление первого слоя определяются

равными соответственно 1050 м и 1000 Ом·м и второго — 6300 м и 100 Ом·м.

Вторая группа кривых с целью более детального изучения строения верхней части разреза записывалась с малым разномом: $\tau = 4 \div 8$ км. В результате зондирований установлено, что центральная часть массива до глубины порядка 4–5 км представляет собой четырехслойную геоэлектрическую структуру, причем первый и третий слои имеют практически одинаковые сопротивления, равные 1000 Ом·м, и мощности порядка 1000 м. Между первым и третьим слоями залегает проводящий слой сопротивлением 63 Ом·м и мощностью порядка 500 м. Четвертый слой имеет сопротивление порядка 200 Ом·м. Его мощность по кривым, записанным с малым разномом, не определяется.

Зондирование, проведенное на северном участке Хабаровинского массива, в районе с. Белашапка, указывает на резкое изменение геоэлектрического строения разреза: получается, что на этом участке высокоомный слой отсутствует и разрез имеет простое двуслойное строение, причем мощность верхнего слоя равна 2 км, а удельное сопротивление — 100 Ом·м. Удельное сопротивление второго слоя равно 1000 Ом·м. Мощность второго слоя по кривой зондирования, записанной с малым разномом $\tau = 4,5$ км, не определяется.

Рассмотренная многослойная модель геоэлектрического строения Сакмарской зоны удовлетворительно увязывается с геологическими данными. Принципиальное значение для интерпретации геофизических материалов имеют зондирования, проведенные на Хабаровинском массиве: они показали высокое сопротивление (400 – 1000 Ом·м) массивных гипербазитов и габбро. Учитывая это, с большой степенью вероятности опорный горизонт первого и второго профилей, характеризующийся аналогичными значениями удельных сопротивлений, можно также отнести к комплексу массивных гипербазитов и габбро, подстилающему вулканогенно-осадочные серии (меланократовый фундамент эвгеосинклинали).

Выше по этим профилям прослеживается горизонт мощностью 200 – 500 м с низкими значениями удельных сопротивлений — 4–50 Ом·м, преимущественно 10–15 Ом·м. Его природа не вполне ясна. Предположительно он может рассматриваться как вулканогенно-осадочная толща, наиболее насыщенная брекчированными серпентинитами (меланж). Их появление обусловлено подвижками пластин по серпентинизированной кровле массивных гипербазитов. Присутствие таких брекчий в Ленинском районе подтверждается прямыми полевыми наблюдениями.

Другая отличительная особенность горизонта низких сопротивлений — приуроченность к нему основной массы песчаников ордовика, являющихся хорошими проводниками. По-видимому, с наличием серпентинитовых брекчий и ордовикских песчаников связана высокая проводимость этого горизонта. Общей же неоднородностью его состава объясняется большой диапазон значений удельных сопротивлений.

Два верхних горизонта характеризуются некоторым повышением сопротивлений (40–160 Ом·м). В местах зондирований по первому и второму профилям эти горизонты уверенно можно сопоставить с относительно слабо дислоцированным пакетом покровных пластин, сложенных породами, резко отличающимися по значениям ρ . В разрезе здесь чередуются кремни, кремнистые туффиты, альбитофиры, диабазы, являющиеся плохими проводниками, и песчаники, туфы, характеризующиеся малым значением удельных сопротивлений.

Комбинация этих двух категорий пород дает среднее значение сопротивлений, хотя и наблюдается существенный разброс цифр. Некоторое повышение проводимости приповерхностного горизонта мощностью 0–250 м, по-видимому, связано с большой выветренностью пород и насыщенностью их грунтовыми водами.

Ниже опорного горизонта максимально высоких (400–1000 Ом·м) сопротивлений залегает горизонт со значениями $\rho = 4 \div 5$ Ом·м. Глубина залегания кровли этого слоя уверенно определяется на всем протяжении первого и второго профилей, т.е. практически повсеместно в Ленинском районе. Отдельные зондирования, проведенные в пределах краевого прогиба и Зилаирского синклинория, показали, что такая проводимость обычно свойственна слабометаморфизованным песчано-глинистым толщам. Присутствие проводящего горизонта, сопоставляемого нами с терригенными отложениями, согласуется с отмечавшимися выше представлениями об общей аллохтонной природе Сакмарской зоны, которая рассматривается нами как покровная масса, залегающая на проводящей терригенной толще (скорее всего на зилаирской свите). Максимальная мощность аллохтона в Ленинском районе — 1800 м.

В пользу таких построений говорят зондирования, проведенные в северной части Сакмарской зоны (район большого Абишева и верховьев Куруила). Сакмарская зона с запада на восток ограничена здесь выходами зилаирских песчаников ($D_3 - C_1$). Результаты предварительных зондирований показали, что проводящий горизонт, который являются эти песчаники, навстречу проходит под высокоомными отложениями ордовика и силура.

Рассматривая конфигурацию второго профиля (см. рис. 4.10, б), необходимо отметить, что его общая синклиналиная форма увязывается с представлениями о синформной структуре зоны. Воздымание к востоку всех геоэлектрических слоев в районе пос. Ленинского (ЧЭЗ № 2) пространственно совпадает с системой меридиональных антиклиналей (Косистекская, Карабутакская). Далее к востоку слои вновь погружаются. Пятислойная модель здесь (западные окраины Кимперсайского массива) сохраняется, хотя мощности отдельных горизонтов заметно различаются. Такая перестройка структуры связана с меридиональным Акайским разломом. Общее увеличение значений удельных сопротивлений всех горизонтов можно объяснить нарастанием степени метаморфизма отложений.

Кратко остановимся на интерпретации геоэлектрического разреза по третьему профилю, проведенному параллельно и к югу от рус-

ла р. Урал (водораздел его левых притоков: рек Терекла и Сартогай). Зондирования показали здесь двуслойную модель. Для верхнего слоя (мощность 250–600 м) получены значения $\rho = 120 \div 250$ Ом·м. Ниже находится слой с удельным сопротивлением 40 Ом·м. Его нижняя граница не установлена.

Таким образом, в рассматриваемом участке Ленинского района происходит принципиальная перестройка структуры Сакмарской зоны. Граница между двумя типами геоэлектрических разрезов намечается между зондированиями, проведенными по водоразделу рек Колымбай и Коктогай, с одной стороны, и Алимбет – с другой. Именно здесь по геологическим данным проходит широтная тектоническая зона, рассматриваемая как поперечный разлом, разделяющий два участка существенно разной структуры. Это различие заключается в более хаотичном строении левобережья р. Урала, обусловленном широким развитием серпентинитового меланжа. По-видимому, верхний горизонт здесь соответствует вулканогенно-осадочной толще палеозоя, относительно слабо насыщенной меланжем. Это, а также присутствие крупных (4–6 км²) блоков и чешуй массивных габбро, возможно, определяет относительно высокие значения сопротивления верхнего горизонта. Расположенный ниже слой ($\rho = 40$ Ом·м) соответствует серпентинитовому меланжу.

Такая интерпретация разреза весьма условна, поскольку значения сопротивления меланжа в естественном залегании неизвестны. Однако, учитывая различия в строении двух отмеченных участков района, рассмотренный вариант можно считать наиболее вероятным.

Зондирования на Хабаровском массиве (см. рис. 4.10, *в*) дали пятислойную модель, резко отличающуюся от модели по первому и второму профилям. Уже указывалось, что верхний слой (максимальная мощность 1500 м) характеризуется значениями $\rho = 400 \div 1000$ Ом·м и четко сопоставим с массивными гипербазитами и габбро. По направлению к северу он выклинивается строго в соответствии с северной границей массива. В северной части профиля ниже залегает горизонт 2 с $\rho = 60 \div 100$ Ом·м. Его мощность, равная в центральной части массива 500 м, к северу увеличивается до 2000–2200 м. Зондирование № 44 показало, что такие сопротивления характерны для кремнистых туффов, туфоаргиллитов и песчаников ($O_2 - S_1$). Эти породы обрамляют с севера гипербазиты, погружаясь под них.

Третий горизонт (мощность до 1500 м, $\rho = 1000$ Ом·м) также сопоставляется с массивными гипербазитами. Он соответствует, по-видимому, четвертому слою на первых двух профилях. Ниже залегает мощный горизонт (четвертый слой) с сопротивлениями $\rho = 100 \div 200$ Ом·м. По направлению к югу второй и третий слои выклиниваются, и гипербазиты Хабаровского массива (первый слой) залегают непосредственно на слое четвертом. Природа последнего не ясна. Предположительно он может быть сопоставлен с рифей-нижнепалеозойскими отложениями Эбетинской антиклинали, расположенной непосредственно к востоку от Хабаровского массива. Здесь

развиты песчаники, филлиты, кремни, содержащие многочисленные пластовые тела и покровы диабазов.

В заключение отметим, что данные, полученные при изучении геоэлектрического строения Сакмарской зоны методом ЧЗ, не противоречат ее покровной структуре и подтверждают общее синформное строение аллохтона, сложенного толщами с высокими удельными сопротивлениями и подстилаемого проводящим горизонтом, сопоставленным с зилаирскими песчаниками. Присутствие двух горизонтов с аномально высокими сопротивлениями, соответствующими массивным гипербазитам, хорошо увязывается с геологическими данными. Верхний горизонт сопоставлен с гипербазитами Хабаровского массива, нижний вскрыт в ядрах наиболее крупных антиклиналей в Ленинском районе и, возможно, является западным продолжением Кемпирсайского массива.

- Астраханцев Г.В. Электромагнитное зондирование для изучения локальных проводников и слоистых сред. Автореф. канд. дис. Ин-т геофизики УФАН СССР, 1962.
- Болталин А.П., Иванов А.П., Иова Г.М., Эненштейн Б.С. Способ геологической разведки. Авт. свид. № 219706. - Изобретения, промышленные образцы, товарные знаки, 1968а, № 19.
- Болталин А.П., Иванов А.П., Иова Г.М., Эненштейн Б.С. Станция для непрерывных частотных зондирований. Авт. свид. № 228799. - Изобретения, промышленные образцы, товарные знаки, 1968б, № 32.
- Ваньян Л.Л. К теории дипольных электромагнитных зондирований. - Прикладная геофизика, 1957, вып. 16.
- Ваньян Л.Л. Некоторые вопросы теории частотных зондирований горизонтальных напластований. - Прикладная геофизика, 1959, вып. 23.
- Ваньян Л.Л. Электромагнитное поле гармонического диполя, заземленного на поверхности многослойной анизотропной среды. - Изв. АН СССР. Сер. геофиз., 1963, № 8.
- Ваньян Л.Л. Основы электромагнитных зондирований. М., "Недра", 1965.
- Ваньян Л.Л. Становление электромагнитного поля и его использование для решения задач структурной геологии. Новосибирск, "Наука", 1966.
- Ваньян Л.Л., Ложеницына Л.В., Морозова Г.М. и др. Трехслойные палетки частотного зондирования. Новосибирск, "Наука", 1963.
- Ваньян Л.Л., Ложеницына Л.В., Морозова Г.М. и др. Четырехслойные палетки частотного электромагнитного зондирования. Новосибирск, "Наука", 1964.
- Гасаненко Л.Б., Шолпо Г.П. К теории электромагнитных зондирований. - В кн.: Вопросы геофизики, вып. 12. Л., Изд-во ЛГУ, 1960.
- Гарецкий Р.Г., Иванов М.А., Круль Э.Л. и др. Опыт применения методов электромагнитных зондирований для изучения глубинного строения Базайского газоносного месторождения в северо-западном Приаралье. - Нефтегазовая геология и геофизика, 1967, № 8.
- Дмитриев В.И. Расчет электромагнитного поля в методе частотного зондирования. - В кн.: Вычислительные методы и программирование, вып. 3. М., Изд-во МГУ, 1965.
- Дмитриев В.И. Общий метод расчета электромагнитного поля в слоистой среде. - В кн.: Вычислительные методы и программирование, вып. 10. М., Изд-во МГУ, 1968.
- Дмитриев В.И. Электромагнитные поля в неоднородных средах. М., Изд-во МГУ, 1969.
- Дмитриев В.И., Королева К.П., Скугаревская О.А., Федорова Э.А. Электромагнитное поле электрического диполя над геоэлектрическим разрезом, содержащим мощные высокоомные слои. - Изв. АН СССР. Физ. Земли, 1974, № 11.
- Дмитриев В.И., Моисеева Т.С., Скугаревская О.А., Федорова Э.А. Некоторые особенности электромагнитного поля электрического диполя в высокоомных разрезах. - В кн.: Вычислительные методы и программирование, вып. 24. М., Изд-во МГУ, 1975.
- Дмитриев В.И., Скугаревская О.А., Федорова Э.А. О высокочастотной асимптотике электромагнитного поля в слоистой среде. - Изв. АН СССР. Физ. Земли, 1970, № 2.
- Дмитриев В.И., Скугаревская О.А., Фролов П.П. Некоторые вопросы становления электромагнитного поля в ближней зоне. М., Изд-во МГУ, 1973.
- Жамалетдинов А.А. Электронно-проводящие образования С-З Кольского полуострова и их влияние на результаты глубинных зондирований. Автореф. канд. дис., ЛГУ, 1976.
- Жамалетдинов А.А., Иванов А.П., Круль Э.Л., Порай-Кошиц А.М. Первый опыт частотного электромагнитного зондирования на Кольском полуострове. - Апатиты, КФ АН СССР, 1973.
- Заборовский А.И. Переменное электромагнитное поле в электроразведке. М., Изд-во МГУ, 1960.
- Завадская Т.Н. К вопросу о связи координат экстремальных точек кривых магнитотеллурического зондирования с параметрами разреза. - Разведочная геофизика, 1964, вып. 9.
- Зернято В.Г., Четаев Д.Н. О влиянии внешней цепи на входное сопротивление витка. - Журн. техн. физики, 1959, 29, вып. 8.
- Иванов А.П. Непрерывные частотные электромагнитные зондирования геологических структур. М., "Наука", 1975.
- Иванов А.П., Круль Э.Л. Способ оценки параметров h_l и ρ_l геоэлектрического разреза типа $\mu_2 = \infty$ по правым ветвям кривых частотных зондирований. - Изв. АН СССР. Физ. Земли, 1975, № 8.
- Иванов А.П., Никитина В.Н. Исследование динамических частотных характеристик слоистых геоэлектрических структур. - Изв. АН СССР. Физ. Земли, 1968, № 3.
- Иванов А.П., Никитина В.Н., Скугаревская О.А. Способ низкочастотного электромагнитного зондирования. Авт. свид. № 164085. - Изобретения, промышленные образцы, товарные знаки, 1963, № 3.
- Иванов А.П., Никитина В.Н., Скугаревская О.А. Частотная интерпретация кривых становления электромагнитного поля. - Изв. АН СССР. Сер. геофиз., 1964а, № 3.
- Иванов А.П., Никитина В.Н., Скугаревская О.А. О беспалеточной интерпретации кривых частотного зондирования, близких к двуслойным. - Изв. АН СССР. Физ. Земли, 1966, № 4.
- Иванов А.П., Никитина В.Н., Эненштейн Б.С. О входном сопротивлении заземленного электрического диполя. - Изв. АН СССР. Сер. геофиз., 1964б, № 9.
- Иванов А.П., Перфильев А.С., Порай-Кошиц А.М. и др. Геологическая интерпретация данных частотных электромагнитных зондирований на западном склоне Южного Урала. - Изв. АН СССР. Сер. геол., 1973а, № 3.
- Иванов А.П., Порай-Кошиц А.М., Сорокин Н.И. и др. О внутреннем геоэлектрическом строении фундамента Украинского кристаллического массива. - ДАН СССР, 1973б, 213, № 2.
- Краев А.П. Основы геоэлектрики. М., "Недра", 1965.
- Кузнецов А.Н. Частотные зондирования над разрезами с негоризонтальными границами. Автореф. канд. дис., ВНИИ геофизики, 1966.

- Матвеев Б.К. Интерпретация электромагнитных зондирований. М., "Недра", 1974.
- Никитина В.Н., Эненштейн Б.С. Определение электрических свойств кристаллического фундамента в естественном залегании. - Изв. АН СССР. Физ. Земли, 1968, № 12.
- Обухов Г.Г. О некоторых свойствах нестационарных электромагнитных полей в Земле и их использование в электроразведке. - Изв. АН СССР. Физ. Земли, 1968, № 9.
- Светов Б.С. Теория, методика и интерпретация материалов низкочастотной индуктивной электроразведки. М., "Недра", 1973.
- Светов Б.С., Сидельникова Т.А., Скугаревская О.А. Относительные измерения при частотных зондированиях геоэлектрических структур. Разведочная геофизика, 1976а, вып. 70.
- Светов Б.С., Сидельникова Т.А., Скугаревская О.А. Использование импедансных частотных зондирований для изучения многослойного геоэлектрического разреза. - Разведочная геофизика, 1976б, вып. 73.
- Сидоров В.А., Тикшаев В.В. Электроразведка зондированиями становлением поля в ближней зоне. - Труды Нижневолжского НИИ геологии и геофизики. Саратов, 1969.
- Скугаревская О.А. Теоретическое изучение становления электромагнитного поля в слоистых средах. Автореф. канд. дис., Ин-т физики Земли АН СССР, 1959.
- Скугаревская О.А., Федорова Э.А., Дмитриев В.И., Королева К.П. Особенности электромагнитного поля над геоэлектрическим разрезом, содержащим непроводящий слой. - Изв. АН СССР. Физ. Земли, 1971, № 11.
- Терехин Е.И., Фомина В.И. Установка для измерений по методу становления электромагнитного поля. Авт. свид. № 153087. - Изобретения, промышленные образцы, товарные знаки, 1963, № 6.
- Тихонов А.Н. О становлении электрического тока в однородном проводящем полупространстве. - Изв. АН СССР. Сер. геогр. и геофиз., 1946, 10, № 3.
- Тихонов А.Н. О единственности решения задачи электроразведки. - ДАН СССР, 1949, 69, № 6.
- Тихонов А.Н. О становлении электромагнитного поля в слоистой среде. - Изв. АН СССР. Сер. геогр. и геофиз., 1950а, 14, № 3.
- Тихонов А.Н. Об определении электрических характеристик глубинных слоев земной коры. - ДАН СССР, 1950б, 73, № 2.
- Тихонов А.Н. О распространении переменного электромагнитного поля в слоистой анизотропной среде. - ДАН СССР, 1959, 126, № 5.
- Тихонов А.Н., Дмитриев В.И., Королева К.П. и др. Теоретические кривые частотных зондирований геологических структур. Двуслойная структура. М., "Наука", 1973.
- Тихонов А.Н., Дмитриев В.И., Скугаревская О.А., Шахсуваров Д.Н. Таблицы амплитуд и фаз электромагнитного поля в слоистом полупространстве, вып. 1. М., Изд-во МГУ, 1967.
- Тихонов А.Н., Дмитриев В.И., Скугаревская О.А. Таблицы амплитуд и фаз электромагнитного поля в слоистом полупространстве, вып. 2. М., Изд-во МГУ, 1968а.
- Тихонов А.Н., Дмитриев В.И., Скугаревская О.А., Федорова Э.А. Таблица амплитуд фаз электромагнитного поля в слоистом полупространстве, вып. 3. М., Изд-во МГУ, 1968б.
- Тихонов А.Н., Дмитриев В.И., Скугаревская О.А., Федорова Э.А. Таблицы амплитуд и фаз электромагнитного поля в слоистом полупространстве, вып. 4. М., Изд-во МГУ, 1968в.
- Тихонов А.Н., Мухина Г.В. Определение переменного электромагнитного поля в слоистой среде. - Изв. АН СССР. Сер. геогр. и геофиз., 1950, 14, № 2.
- Тихонов А.Н., Скугаревская О.А. О становлении электрического тока в неоднородной слоистой среде. - Изв. АН СССР. Сер. геогр. и геофиз., 1950, 14, № 4.
- Тихонов А.Н., Скугаревская О.А. Об асимптотическом поведении процесса становления электромагнитного поля в слоистых средах. - Изв. АН СССР. Сер. геофиз., 1959, № 7.
- Тихонов А.Н., Скугаревская О.А., Фролов П.П. К вопросу о разрешающей способности метода становления магнитного поля. - Изв. АН СССР. Физ. Земли, 1965, № 5.
- Тихонов А.Н., Шахсуваров Д.Н. Метод расчета электромагнитных полей, возбуждаемых переменным током в слоистых средах. - Изв. АН СССР. Сер. геофиз., 1956, № 3.
- Тихонов А.Н., Шахсуваров Д.Н. Электромагнитное поле диполя в дальней зоне. - Изв. АН СССР. Сер. геофиз., 1959, № 7.
- Тихонов А.Н., Шахсуваров Д.Н., Рыбакова Е.В. О разрешающей способности метода электромагнитного зондирования при наличии промежуточных непроводящих пластов. - Изв. АН СССР. Сер. геофиз., 1959, № 10.
- Тихонов А.Н., Эненштейн Б.С., Скугаревская О.А., Никитина В.Н. Изучение внутреннего строения кристаллического фундамента электромагнитными зондированиями. - ДАН СССР, 1967, 173, № 5.
- Фок В.А., Бурсиан В.Р. Электромагнитное поле переменного тока в цепи с двумя заземлениями. - Журн. Русск. физ.-хим. об-ва, 1926, 58.
- Фролов П.П. Теоретическое изучение процесса становления электромагнитного поля в слоистых средах. Автореф. канд. дис., Ин-т физики Земли АН СССР, 1964.
- Фролов П.П. Об асимптотическом поведении становления магнитного поля в слоистой среде. - Изв. АН СССР. Физ. Земли, 1965 № 1.
- Четаев Д.Н. Изучение неустановившихся режимов электромагнитных полей в неоднородных средах. Автореф. канд. дис., Ин-т физики Земли АН СССР, 1953.
- Четаев Д.Н. Новый метод решения основной задачи теории дипольных электромагнитных зондирований. - Геология и геофизика, 1962, № 2.
- Шахсуваров Д.Н. Некоторые вопросы теории дипольных электромагнитных зондирований. Автореф. канд. дис., Ин-т физики Земли АН СССР, 1959а.
- Шахсуваров Д.Н. Методика интерпретации результатов наблюдений электромагнитного поля при дипольном зондировании. - Изв. АН СССР. Сер. геофиз., 1959б, № 5.
- Шахсуваров Д.Н., Зверева Е.В. К расчету электромагнитного поля погруженного электрического диполя. - Изв. АН СССР. Физ. Земли, 1966, № 9.
- Щевнин В.А. Сводные номограммы-палетки для интерпретации двуслойных кривых частотного зондирования. - Изв. вузов. Геология и разведка, 1973, № 12.
- Шейнман С.М. Об установлении электромагнитных полей в Земле. - Прикладная геофизика, 1947, вып. 3.

Эненштейн Б.С. К методике интерпретации кривых электромагнитных зондирований. - Изв. АН СССР. Сер. геофиз., 1957а, № 12.

Эненштейн Б.С. Интерпретация двуслойных кривых частотного зондирования. - Изв. АН СССР. Сер. геофиз., 1957б, № 9.

Эненштейн Б.С. Интерпретация трехслойных кривых частотных электромагнитных зондирований типа А и Н. - ДАН СССР, 1966а, 168, № 5.

Эненштейн Б.С. Методика интерпретации трехслойных кривых электромагнитных зондирований. - Изв. АН СССР. Физ. Земли, 1966б, № 9.

Эненштейн Б.С. Способ беспараметрической интерпретации трехслойных кривых электромагнитных зондирований типа К и Q. - ДАН СССР, 1966в, 168, № 4.

Эненштейн Б.С. Способы интерпретации двуслойных кривых частотного зондирования. - Изв. АН СССР. Физ. Земли, 1967, № 9.

Эненштейн Б.С. Об эквивалентности геоэлектрических разрезов в методе частотного зондирования. - ДАН СССР, 1973, 209, № 3.

Эненштейн Б.С., Иванов А.П. Полевая электромагнитная станция для глубинной геологической разведки. М., ВИНТИ, 1958.

Эненштейн Б.С., Иванов А.П. Метод непрерывных частотных зондирований. - Изв. АН СССР. Сер. геофиз., 1961, № 11.

Эненштейн Б.С., Иванов А.П., Иванов М.А. Станция для частотного зондирования. - В кн.: Вопросы теории и практики электрометрии. М., Изд-во АН СССР, 1961.

Эненштейн Б.С., Иванов А.П., Рыбакова Е.В. Методика электромагнитного зондирования геологических структур. - Разведка и охрана недр, 1958а, № 7.

Эненштейн Б.С., Иванов А.П., Рыбакова Е.В. Способ многочастотного зондирования. Авт. свид. № 111226. - Бюл. изобретений, 1958б, № 2.

Эненштейн Б.С., Круль Э.Л., Липская Н.В. и др. Опыт совместных исследований методами частотных и магнитотеллурических зондирований. М., "Наука", 1969.

Эненштейн Б.С., Ушаков Е.М., Иванов А.П., Макаров В.И. Способ глубинной электроразведки. Авт. свид. № 111722. - Бюл. изобретений, 1958в, № 3.

Boltalin A.P., Ivanov A.P., Iova G.M., Enenstein B.S. Installation pour sondage fréquentiel électromagnétique continu. - Bull. offic. Propr. ind., 1968, N 1.529.061, N 1.527.548.

Boltalin A.P., Ivanov A.P., Iova G.M., Enenstein B.S., Procédé de prospection géologique. - Bull. offic. Propr. ind., 1969а, N 1.559.804.

Boltalin A.P., Ivanov A.P., Iova G.M., Enenstein B.S. Unit for continuous electromagnetic frequency sounding. - Canad. Patent, 1969b, N 809794.

Boltalin A.P., Ivanov A.P., Iova G.M., Enenstein B.S. Method of geologic surveying. - Canad. Patent, 1970а, N 833727.

Boltalin A.P., Ivanov A.P., Iova G.M., Enenstein B.S. Method for geophysical exploration with signals conforming to an exponential law. - United States Patent, 1970b, N 3.551.789.

Boltalin A.P., Ivanov A.P., Iova G.M., Enenstein B.S. Unit for continuous electromagnetic frequency sounding. - Canad. Patent, 1970c, N 836764.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
<i>Глава I</i>	
НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ТЕОРИИ МЕТОДА ЧАСТОТНЫХ ЗОНДИРОВАНИЙ	7
Модель геоэлектрического разреза	-
Математические основы метода частотных зондирований	10
Электромагнитное поле над однородным полупространством	13
Кажущее сопротивление на переменном токе	14
Некоторые особенности полей в методе частотных зондирований	16
<i>Глава II</i>	
МЕТОДИКА ЧАСТОТНЫХ ЗОНДИРОВАНИЙ	38
Выбор оптимальных параметров установки для зондирования	-
Определение диапазона рабочих частот	41
Выбор величины разноса	43
Выбор длины линий АВ, MN и площадей рамок S	44
Частотные характеристики питающей и приемной линий	47
Выбор оптимального закона и скорости изменения частоты питающего тока во времени при непрерывных частотных зондированиях	50
Аппаратура для зондирований на дискретных частотах и ее технические характеристики	51
Аппаратура для непрерывных частотных зондирований и ее технические характеристики	53
Методика проведения полевых исследований	55
Радиальные частотные зондирования	60
Зондирования в условиях помех	-
Методика зондирования низкоомных и высокоомных геоэлектрических структур	62
О зондировании в условиях сложного рельефа местности	71
О частотных зондированиях негоризонтальных напластований	75
<i>Глава III</i>	
ПРИЕМЫ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ КРИВЫХ	81
Палеточная интерпретация	85
Графическая интерпретация	87
Аналитическая интерпретация	96
О возможности интерпретации кривых, записанных не полностью	100

Глава IV.

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВА-	
НИЙ, ПРОВЕДЕННЫХ МЕТОДОМ ЧАСТОТНЫХ ЗОНДИРОВАНИЙ . . .	111
Определение мощности осадочного чехла и удельного сопротивления	
кровли фундамента	-
Определение геоэлектрического строения разрезов, содержащих высо-	
коомные пласты	116
Исследование внутреннего строения фундамента	120
Геологическая интерпретация данных частотных электромагнитных	
зондирований	123
ЛИТЕРАТУРА	132

**Алексей Петрович Иванов,
Ольга Александровна Скугаревская**

**МЕТОДИКА ЧАСТОТНЫХ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЗОНДИРОВАНИЙ**

*Утверждено к печати
Ордена Ленина институтом
физики Земли им. О.Ю. Шмидта АН СССР*

*Редактор С.Д. Казанчева
Художник А.В. Пушкарный
Художественный редактор Т.П. Поленова
Технические редакторы Н.А. Посканная и
Н.Н. Копнина*