

МИНИСТЕРСТВО ГЕОЛОГИИ СССР  
ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-  
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ  
ГЕОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ РАЗВЕДКИ

---

# ПРИКЛАДНАЯ ГЕОФИЗИКА

ВЫПУСК 109

Издается с 1945 г.



МОСКВА «НЕДРА» 1984

в минимум, который становится все глубже к середине неоднородности.

Как видим, продольные и поперечные кривые в районе неоднородности имеют существенно различную форму. В центре неоднородности кривые расходятся приблизительно на порядок.

Очевидно, что при интерпретации таких искаженных кривых мы будем получать погрешности в определении параметров геоэлектрического разреза. Чтобы оценить эти погрешности, была выполнена формальная интерпретация продольных кривых. На рис. 1 показан действительный геоэлектрический разрез и нанесены кровля и подошва проводящего включения по данным интерпретации продольных кривых.

Картина получилась в общем-то характерная для индукционных искажений кривых МТЗ: растягивание проводящего включения вдоль профиля при уменьшении глубины его верхней кромки в середине модели и увеличении ее за пределами неоднородности. Важно отметить, что высокоомный экран почти не влияет на форму продольных кривых МТЗ, зато существенно нормализует поперечные. Если в отсутствии экрана поперечные кривые сильно искажены в области низких частот и смещены вниз по оси сопротивлений более чем на порядок [2], то благодаря действию экрана кривые рт приобретают форму, близкую к нормальной, и характеризуются лишь небольшим смещением вверх. В такой ситуации поперечные кривые МТЗ дают более достоверную информацию о геоэлектрическом разрезе.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Геоэлектрическая модель Прибайкалья*/М. Н. Бердичевский, Л. Л. Ваньян, В. А. Кузнецов и др. — В кн.: *Геолого-геофизические исследования озера Байкал*. М., Наука, 1979, с. 126—142.

2. *Нечаева Г. Н., Лебедева Н. А.* Искажения кривых МТЗ в районах с разломной тектоникой. — *Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли*, 1980, № 11, с. 101—105.

3. *Юдин М. Н.* К расчету магнитотеллурического поля методом сеток в неоднородных средах. — V *Всесоюз. школа-семинар по электромагнитным зондированиям*: Тез. докл. Киев, Наукова думка, 1978, с. 18—19.

УДК 550.837.3

**И. Н. МОДИН, В. А. ШЕВНИН**

### **СООТВЕТСТВИЕ ДАННЫХ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКИ ЛОГНОРМАЛЬНОМУ ЗАКОНУ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ**

---

В связи с исчерпанием резерва легкооткрываемых месторождений и постоянным расширением класса решаемых геолого-поисковых

задач в последнее время все более заметной становится тенденция к усложнению задачи поиска, стремление к обнаружению более сложных объектов, что в геофизических методах исследований приводит к уменьшению контрастности геофизических аномалий и к относительному увеличению влияния геологических помех. В таких условиях одним из путей повышения эффективности геофизических работ является совершенствование обработки и интерпретации данных, позволяющее изучать слабые геофизические аномалии, более полно и адекватно извлекать содержащуюся в них полезную информацию. Для выявления, анализа и интерпретации слабых аномалий начинают широко применяться вероятностно-статистические методы, учитывающие наличие помех. При статистической обработке данных важное значение имеет правильная оценка параметров физико-геологических моделей (ФГМ) как самого объекта поисков, так и вмещающей среды, причем параметры формируемых моделей также имеют вероятностный характер.

Статистическая обработка оказывается наиболее эффективной тогда, когда удается выявить соответствие экспериментальных данных, определенному математическому закону распределения и получить устойчивые и представительные оценки параметров этого распределения. Таким образом, этапу формирования ФГМ должен предшествовать этап оценки статистических свойств полевых данных и выбор наиболее подходящего закона распределения.

При обработке данных грави- и магниторазведки, где вероятностно-статистические методы получили наибольшее распространение, широко и обоснованно используется нормальный закон распределения. Однако для электроразведки, как показывает практика, распределение экспериментальных данных часто отличается от нормального закона. Многие исследователи (И. М. Блох, Г. С. Вахромеев, В. К. Рыбин, А. П. Савин, В. С. Якупов и др.) указывают, что значения  $\rho$  и  $\rho_k$ , как правило, подчиняются логнормальному закону. Можно привести немало примеров, когда формальный подход к обработке и интерпретации электроразведочных данных без учета закона распределения снижает эффективность обработки информации и нередко приводит к недоразумениям, к появлению физических противоречий, служит основой для неправильных геологических выводов.

Цель данной статьи — обратить внимание электроразведчиков на неслучайность подчинения электроразведочных данных логнормальному закону распределения, попытаться раскрыть физическую сущность этого явления и указать на необходимость постоянного учета логнормального закона на всех этапах обработки и интерпретации данных.

Основными параметрами в электроразведке являются удельное электрическое сопротивление ( $\rho$ , УЭС) — физическое свойство горных пород, слагающих геологический разрез, и кажущееся сопротивление ( $\rho_k$ , КС) — результат измерения электрических полей на поверхности геологического разреза, зависящий от УЭС пород в точке измерения.

I. Многочисленные экспериментальные проверки законов распределения УЭС и КС показывают, что однородные и достаточно большие выборки, как правило, подчиняются логнормальному закону. Такие проверки проводились В. С. Якуповым для талых и мерзлых пород Северо-Востока СССР, авторами для Центрального Казахстана [2], Г. С. Вахромеевым для Восточной Сибири. В некоторых случаях, когда значения КС меняются в узких пределах, а объем выборки невелик, данные могут аппроксимироваться и нормальным законом. Авторы проверяли соответствие логнормальному закону выборок КС разного объема для разных участков Центрального Казахстана. Оказалось, что при малом объеме выборки ( $n=20 \div 50$ ) примерно равное число выборок соответствует нормальному и логнормальному законам. При объеме выборки 100 точек около 70 % случаев соответствует логнормальному закону. Для  $n=300$  отклонения от логнормального закона встречаются редко и в основном связаны с полимодальностью выборок. Для  $n=500 \div 700$  и более все проверки, даже при слабой изменчивости КС, дают логнормальный закон. Таким образом, с увеличением объема выборок проверки распределений КС все однозначнее указывают на логнормальный закон.

II. Мерой точности в электроразведке является не абсолютная, а относительная погрешность. Это отражено в инструкции по электроразведке, а вызвано тем, что дисперсия данных зависит от среднего уровня КС и, следовательно, абсолютное значение дисперсии не является представительной оценкой погрешности съемки, тогда как отношение дисперсии к среднему значению может служить такой представительной оценкой. Из математической статистики известно, что среднее выборки  $\bar{x}$  и дисперсия  $S$  независимы тогда и только тогда, когда рассматриваемая выборка подчиняется нормальному закону. Если же дисперсия оказывается пропорциональной достигнутому значению случайной величины, то мы имеем логнормальное распределение.

III. Значение КС на поверхности земли вычисляется по формуле  $\rho_k = K\Delta U/I$  или  $\rho_k = KE_x \cdot MN/I$  ( $K$  — коэффициент установки;  $I$  — ток в линии  $AB$ ;  $MN$  — длина приемной линии;  $E_x$  — напряженность поля;  $\Delta U$  — разность потенциалов на  $MN$ ), т. е. определяется величиной напряженности электрического поля в точке измерения. На вертикальном контакте двух сред с плотностями  $j_{n1}$  и  $j_{n2}$  выполняется граничное условие  $j_{n1} = j_{n2}$  или  $E_{n1}/\rho_1 = E_{n2}/\rho_2$ , откуда  $E_{n1}/E_{n2} = \rho_1/\rho_2$ . Таким образом, перепад КС (величина аномалии) над контактом будет определяться отношением УЭС контактирующих пород. В горизонтально-слоистой среде

$$\rho_k = \rho_1 r^2 \int_0^{\infty} R m J_1(mr) dm,$$

где

$$R = \text{cth} \{mh_1 + \text{arcth} \rho_2/\rho_1 \text{cth} [mh_2 + \text{arcth} \rho_3/\rho_2 \text{cth} (mh_3 + \dots)]\},$$

$h_1, h_2, h_3$  — мощности соответственно первого, второго и треть-

го слоев. И в этом случае величина аномалии  $\rho_k/\rho_1$  определяется отношениями УЭС:  $\rho_2/\rho_1$ ,  $\rho_3/\rho_2$  и т. д. Этот факт учитывается при построении палеток ВЭЗ и ЭП в логарифмическом масштабе, так как только при использовании логарифмического масштаба форма кривых ВЭЗ и ЭП и величина аномалий  $\rho_k$  не зависят от абсолютных значений сопротивлений, что, в свою очередь, как уже указывалось, является существенным признаком логнормального закона.

IV. Величины УЭС горных пород, минералов и руд принимают только положительные значения и обладают наиболее широким диапазоном изменения (от  $10^{-5}$  до  $10^{12}$  Ом·м) среди других физических свойств пород. Значения КС, измеряемые на поверхности геологического разреза, также меняются в широких пределах от долей омметра до нескольких миллионов омметров, хотя на небольших участках эти изменения обычно не превышают двух — трех порядков.

Преобладающее большинство горных пород являются ионопроводящими, и их УЭС определяются количеством и проводимостью влаги, заполняющей поры горных пород. По В. Н. Дахнову [1], зависимость УЭС горных пород от определяющих его факторов может быть выражена формулой

$$\rho_{\Pi} = \Pi_{\text{м}} \cdot \Pi_{\text{п}} \cdot R_{\text{п}} \cdot R_{\text{н}} \cdot R_t \cdot \rho_{\text{в}}, \quad (1)$$

где  $\rho_{\Pi}$  — УЭС горной породы;  $\rho_{\text{в}}$  — УЭС поровой влаги;  $\Pi_{\text{м}}$  — параметр проводимости минералов, учитывающий влияние электропроводности скелетной фракции;  $\Pi_{\text{п}}$  — параметр поверхностной проводимости, учитывающий наличие в породе глинистых частиц;  $R_{\text{п}}$ ,  $R_{\text{н}}$ ,  $R_t$  — параметры соответственно пористости, водонасыщенности, температуры.

Следует отметить важные особенности УЭС горных пород, которые отражает формула (1).

1. Действие каждого фактора, влияющего на УЭС горных пород, проявляется пропорционально достигнутому значению УЭС (закон пропорциональности). Например, если  $\rho$  поровой влаги уменьшается в 2 раза, это снижает УЭС породы с 20 до 10, со 100 до 50 или с 1000 до 500 Ом·м в зависимости от исходного значения УЭС.

2. Совокупное влияние всех факторов проявляется в виде мультипликации вкладов.

Таким образом: а) УЭС принимают только положительные значения, б) они изменяются в очень широких пределах, практически от нуля до бесконечности, в) действие всех факторов, влияющих на УЭС, подчиняется закону пропорциональности. Матерон показал (1968 г.), что именно эффект пропорциональности является основной причиной проявления логнормального распределения. При этом было использовано следующее рассуждение. Пусть величина  $X$  (в нашем случае это УЭС породы) определяется многими природными факторами, действующими независимо (например, влажностью, трещиноватостью пород, минерализацией влаги, температурой и др.). Изменения каждого из независимых факторов вызывают

колебания  $dx$ , зависящие, в силу закона пропорциональности, от достигнутого уровня  $X$ . Поэтому наилучшей характеристикой изменения  $X$  под действием каждого природного фактора является не абсолютное, зависящее от  $X$ , изменение  $dx$ , а относительное  $dx/X$ . Сумма большого числа независимых факторов, или  $\int 1/X dx$ , порождает случайную переменную, распределенную нормально, т. е. величина  $\int 1/X dx = \ln x$  будет распределена нормально, а  $X$  — логнормально.

V. Простейшим видом формулы (1) является соотношение

$$\rho_{\Pi} = R_{\Pi} \rho_{В}, \quad (2)$$

отражающее преобладающее влияние двух важнейших факторов на УЭС горных пород. Рассмотрим эти факторы подробнее.

1. Параметр пористости  $R_{\Pi}$  зависит от пористости (точнее, от открытой пористости или проницаемости), гранулометрического состава (и плотности упаковки зерен) или трещиноватости горных пород (в зависимости от природы пор в породе). Но большинство показателей пористости, проницаемости, трещиноватости, судя по опубликованным данным, также подчиняются логнормальному закону. Крамбейн и Грейбилл указывают на подчиненность этому закону коэффициента проницаемости осадочных горных пород. Гриффитс говорит о логнормальности размеров зерен, а Рац утверждает, что трещиноватость подчиняется логнормальному закону на всех уровнях ее проявления от  $10^{-3}$  см (дефекты кристаллической решетки) до  $10^6$  см (крупные планетарные разрывы).

2. Сопротивление поровой влаги гиперболически связано с концентрацией солей  $C$  в растворе:  $\rho_{В} = A/C$ , где  $A$  — соответствующий коэффициент пропорциональности. Содержание солей в воде есть частный случай распределения химических элементов в горных породах, которое, как правило, подчиняется логнормальному закону. В свое время Аренс даже предложил рассматривать логнормальное распределение как основной закон геохимии.

Таким образом, электроразведочные параметры УЭС и КС оказываются связанными с подчиняющимися логнормальному закону факторами пористости, трещиноватости, размеров зерен, минерализации влаги, в значительной степени определяющими УЭС горных пород. Так как факторы, определяющие  $\rho_{\Pi}$ , связаны с ним, в основном, как произведения или отношения [см. формулы (1) и (2)], а произведения или отношения логнормально распределенных величин также подчиняются логнормальному закону, логнормальный закон распределения распространяется и на  $\rho_{\Pi}$ .

По мнению авторов, изложенные выше соображения свидетельствуют о том, что подчинение электроразведочных данных логнормальному закону распределения является не случайным, а закономерным явлением, отражающим внутреннюю сущность электроразведочных параметров и зависимостей.

Из вывода о логнормальности электроразведочных данных и тезиса о необходимости учета закона распределения на всех этапах статистической обработки и интерпретации вытекает следующее.

1. При графическом изображении электроразведочных данных в виде кривых зондирования, графиков профилирования, карт графиков или карт изолиний площадных съемок, как указывают многие исследователи (И. М. Блох, Б. Г. Сапожников и др.), целесообразно использовать логарифмический масштаб по оси  $\rho_k$  графиков и логарифмически равные сечения на картах изолиний. Это вытекает из зависимости величины аномалий от отношения УЭС контактирующих сред и из принципа равноточности. Логарифмическая шкала дает возможность: а) охватить в едином масштабе любой диапазон изменения КС; б) сохранить постоянство относительной погрешности изображения и считывания независимо от абсолютных значений  $\rho_k$ , поставив их в соответствие с постоянством относительной погрешности измерений; в) добиться равенства амплитуд аномалий для разрезов с одинаковой относительной разницей УЭС независимо от абсолютных значений УЭС и КС, при этом упрощается сравнение графиков КС с теоретическими, т. е. их интерпретация; г) проще учитывать систематические погрешности измерений, так как они проявляются лишь в вертикальном сдвиге графиков без изменения их формы; д) проще оценивать и анализировать графически случайные и флюктуационные погрешности во всем динамическом диапазоне измерений.

2. При преобразовании информации с использованием готовых алгоритмов и вычислительных схем (усреднение, фильтрация, выделение слабых аномалий и т. п.), построенных в предположении нормального закона распределения, следует вместо КС использовать их логарифмы.

3. Для получения средних значений при массовых измерениях электрических сопротивлений горных пород или фоновых оценок КС следует использовать среднее геометрическое, а не среднее арифметическое. При построении для таких оценок гистограмм или графиков накопленных частот следует применять логарифмический масштаб по оси  $\rho$ . Если для дальнейшей обработки данных КС требуется снять влияние фона, необходимо вычислять отношения наблюдаемых и фоновых значений, а не их разности.

4. При установлении корреляционных связей между параметрами графическим путем с использованием точечных диаграмм (коррелограмм) рекомендуется выбирать масштабы по обеим осям в соответствии с законом распределения каждого из коррелируемых параметров. Эти же соображения остаются в силе и при нахождении связи между параметрами вычислительным путем. Так, например, при логнормальном законе распределения линейную корреляцию следует искать между логарифмами параметров.

5. При машинной интерпретации электроразведочных данных, например кривых зондирования методом подбора, следует сопоставлять и минимизировать не разности  $\rho_{k.набл} - \rho_{k.теор}$ , а разности логарифмов  $\lg \rho_{k.набл} - \lg \rho_{k.теор} = \lg (\rho_{k.набл} / \rho_{k.теор})$ , т. е. опять-таки отношения, что заметно ускоряет процесс минимизации.

6. Для совокупностей, подчиняющихся логнормальному распре-

делению, справедлив мультипликативный закон [см., например, формулу (1)], переходящий в аддитивный для логарифмов параметров. Это положение для электроразведки изучено И. М. Блохом (1971 г.) на примере электропрофилирования (ЭП). Установлено, что для формирования графиков ЭП над сложным разрезом нужно перемножить составляющие графики для простых разрезов, предварительно нормированные к своему фону, т. е. фактически сложить логарифмы КС простых аномалий. Эту операцию можно достаточно просто осуществить при построении графиков КС на полулогарифмическом бланке и при графическом суммировании простых аномалий. Подобным образом может быть учтено и влияние рельефа. Авторы [3] использовали этот подход для разделения сложных аномалий от локальных объектов и от горизонтально-слоистой среды при обработке данных ВП ( $\rho_k$  и  $\eta_k$  — кажущаяся вызванная поляризуемость) для установки градиента. В условиях, когда  $\rho_{уд}$  и  $\eta_{уд}$  меняются с глубиной, происходит закономерное изменение  $\rho_k$  и  $\eta_k$  при приближении измерительной установки к питающим заземлениям. Было показано, что для определения фонового изменения  $\rho_k$  и  $\eta_k$  в зависимости от расстояния  $r$  до ближайшего питающего электрода необходимо вычислять средние геометрические значения  $\rho_k$  и  $\eta_k$  для каждого  $r_i$ , а для введения поправок — делить на переменный фон  $\rho_k(r_i)$  и умножать на постоянные асимптотические значения, соответствующие середине разноса  $AB(\bar{\rho}_{ас})$ :  $\rho_{к.испр} = \rho_{к.набл} \bar{\rho}_{ас} / \rho_k(r_i)$ .

Все изложенное относится к УЭС и КС, определяемым в методах постоянного тока. На основании литературных данных и исходя из общих соображений, можно считать, что эти же выводы, видимо, применимы к значениям УЭС и КС, получаемым на переменном токе [ $\rho_T$  (МТЗ),  $\rho_T$  (ЗС),  $\rho_\omega$  (ЧЭМЗ),  $\rho$  (ДЭМП) и т. д.]. В процессе обработки данных метода вызванной поляризации авторы имели возможность убедиться, что значения  $\eta_k$  также подчиняются логнормальному закону. При объеме выборки  $\eta_k$  100 точек наблюдается совпадение как с нормальным, так и с логнормальным законом, но для выборок объемом 700 точек и более  $\eta_k$  всегда оказывается распределенным логнормально.

Из сказанного можно сделать следующие выводы.

Подчинение электроразведочных параметров УЭС и КС логнормальному закону распределения возникает не случайно, а в силу внутренних закономерностей, отражающих логарифмическую природу этих параметров.

Логнормальность распределений сопровождается мультипликативным законом сочетания полей, который становится аддитивным для логарифмов параметров. Это следует учитывать при получении полей над сложными разрезами и при том или ином разделении полей КС на элементарные составляющие.

Логнормальный характер распределения электроразведочных параметров следует учитывать на всех этапах обработки, графического представления и интерпретации данных электроразведки.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дахнов В. Н. Геофизические методы изучения нефтегазоносных коллекторов. М., Недра, 1975.

2. Модин И. Н., Шевнин В. А. Вопросы обработки площадных данных ВП. — В кн.: Материалы V науч. конф. аспирантов и молодых ученых, секц. Геофизика. МГУ, 1978. Деп. в ВИНТИ, рег. № 3124—78 деп.

3. Модин И. Н., Шевнин В. А., Шувалов С. В. Об обработке наблюдений ВП для установки градиента. — В кн.: Материалы VI науч. конф. аспирантов и молодых ученых, секц. Геофизика. МГУ, 1980. Деп. в ВИНТИ, рег. № 1445—80 деп.

УДК 550.831.01

**Б. Н. ВЛАСОВ, В. Г. ФИЛАТОВ**

### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЕРОЯТНОСТНО-СТАТИСТИЧЕСКОГО ПОДХОДА И МЕТОДА РЕГУЛЯРИЗАЦИИ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧИ РАЗДЕЛЕНИЯ ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ПОЛЕЙ

В данной работе приводится описание алгоритма и программы ФОН-2А, которая является модификацией программы ФОН, разработанной во ВНИИГеофизике Е. А. Мудрецовою и В. Г. Филатовым [3]. Модель источников регионального фона включает ступени, горст (грабен), блоки в фундаменте, глубинный рельеф (рис. 1). Поскольку источники фона находятся на значительной глубине, возможна аппроксимация указанных источников более простыми: полуплоскостями, горизонтальными и вертикальными полосами. Гравитационный эффект указанной системы источников определяется формулой

$$\begin{aligned} \Phi(x, z, S) = G \left\{ 2\mu_1 p_1 \left( \frac{\pi}{2} + (-1)^{p_0} \operatorname{arctg} \frac{x - \xi_1}{\zeta_1 - z} \right) + \right. \\ + 2p_2 \mu_2 \left( \operatorname{arctg} \frac{x - \xi_2}{\zeta_2 - z} + \operatorname{arctg} \frac{x - \xi_3}{\zeta_2 - z} \right) + 2p_3 \mu_3 \left( \operatorname{arctg} \frac{x - \xi_4}{\zeta_3 - z} + \right. \\ + \left. \operatorname{arctg} \frac{x - \xi_5}{\zeta_3 - z} \right) + p_4 \mu_4 \ln \frac{(x - \xi_6)^2 + (\zeta_5 - z)^2}{(x - \xi_6)^2 + (\zeta_4 - z)^2} + \\ \left. + p_5 \mu_5 \ln \frac{(x - \xi_7)^2 + (\zeta_7 - z)^2}{(x - \xi_7)^2 + (\zeta_6 - z)^2} + p_6 \mu_6 \ln \frac{(x - \xi_8)^2 + (\zeta_9 - z)^2}{(x - \xi_8)^2 + (\zeta_8 - z)^2} \right\}, \end{aligned}$$

где  $(x, z)$  — точка на рельефе дневной поверхности;  $S = S(\mu_1, \dots, \mu_6, \xi_1, \dots, \xi_8, \zeta_1, \dots, \zeta_8) = \{S_i\}$ ,  $1 \leq i \leq N$  — вектор искомых параметров;  $p_i$  — задаваемые веса составляющих, равные 0 или 1;  $p_0$  — коэффициент, определяющий положение ступени (при  $p_0 = 0$  — справа, при  $p_0 = 1$  — слева);  $G$  — гравитационная постоянная;  $N = 23$  в общем случае;  $N = 17$  — при заданных плотностях;  $N = 6$  — при заданной геометрии;  $N = 13$  — если нет нижнего контакта.

Для данной системы источников в [3] использована теорема единственности, обеспечивающая по теореме Тихонова [4] сходи-