

ОБ ОДНОМ СПОСОБЕ ВИЗУАЛИЗАЦИИ КРАЯ ПРОТЯЖЕННЫХ ОБЪЕКТОВ В НАЗЕМНО-СКВАЖИННОЙ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКЕ.

В.С.МОГИЛАТОВ

*Сибирский научно-исследовательский институт геологии,
геофизики и минерального сырья,
630104, Новосибирск, Красный пр. 67, Россия*

Для электроразведки на постоянном токе, в особенности, для наземно-скважинной электроразведки, предлагается и обосновывается посредством физического и математического моделирования способ трансформации наблюдаемых данных с целью определения положения края протяженной геоэлектрической неоднородности. Способ основан на нормировании и дифференцировании. Особенно рекомендуется в случае непроводящего основания.

Наземно - скважинная электроразведка, постоянный ток, оконтуривание, физическое и математическое моделирование.

Введение.

Проблема оконтуривания в наземно-скважинной электроразведке, также, как и в наземной, решается правильным выбором приемно-питающей установки и максимальным извлечением и визуализацией информации, содержащейся в полевых данных. Но имеется и своя специфика, заключающаяся в больших возможностях манипуляций с элементами установки (погружение) и в возможности использования при интерпретации большей информации о разрезе. В этой работе предлагается и обосновывается некоторый способ трансформации профильных наблюдений, имеющий целью подчеркнуть положение края слабой протяженной геоэлектрической неоднородности. Эффективность этой трансформации решающим образом зависит от правильного выбора источника тока, поэтому мы рассмотрим кратко и этот вопрос.

I. О выборе источника в наземно-скважинной электроразведке.

Выбор питающей установки для наземно-скважинной электроразведки (НСЭ) весьма неоднозначен и зависит от решаемых задач. В нефтяной электроразведке можно выделить, в качестве

основных:

1. Установление местоположения водонефтяного (газового) контакта.
2. Обнаружение края залежи из "пустых" скважин.
3. Раздельное изучение нескольких водонасыщенных коллекторов в разрезе.
4. Обнаружение и прослеживание коллекторов с меньшей проводимостью, чем это возможно с помощью других методов.

Рассматривая залежь, как Т-плоскость, а водонасыщенную часть коллектора, как плоскость S, можно показать, что эти объекты требуют различные источники для максимального своего проявления. Впрочем, уже из физических соображений ясно, что для создания максимального аномального эффекта от Т-объекта необходимо поперечно направленное поле, тогда как S-объект слабо проявит себя в таком поле. Проиллюстрируем это на простом примере. Пусть в однородном пространстве с сопротивлением ρ_0 расположена плоскость S или Т. В точке z_0 над плоскостью помещен точечный источник I. Тогда аномальная часть потенциала в точке $M(r, z)$ определяется выражением:

$$\varphi_a^S = - \frac{I\rho_0}{4\pi} \cdot \int_0^\infty J_0(mr) \cdot \exp[-m(z_0+z)] \cdot \frac{m \cdot S \cdot \rho_0}{2 + m \cdot S \cdot \rho_0} dm, \quad (1)$$

для S-плоскости и для Т-плоскости

$$\varphi_a^T = + \frac{I\rho_0}{4\pi} \cdot \int_0^\infty J_0(mr) \cdot \exp[-m(z_0+z)] \cdot \frac{m \cdot T / \rho_0}{2 + m \cdot T / \rho_0} dm. \quad (2)$$

Теперь поместим источник тока под плоскостью, в точку $(-z_0)$ симметрично первому положению. Потенциал аномального поля от него в той же точке $M(r, z)$ составит

$$\varphi_a^S = - \frac{I\rho_0}{4\pi} \cdot \int_0^\infty J_0(mr) \cdot \exp[-m(z_0+z)] \cdot \frac{m \cdot S \cdot \rho_0}{2 + m \cdot S \cdot \rho_0} dm,$$

$$\varphi_a^T = - \frac{I\rho_0}{4\pi} \cdot \int_0^\infty J_0(mr) \cdot \exp[-m(z_0+z)] \cdot \frac{m \cdot T / \rho_0}{2 + m \cdot T / \rho_0} dm.$$

Таким образом, суммарный эффект от плоскости S для двух источников разной полярности равен нулю, а для плоскости Т он

удваивается. Это означает, что вертикальная электрическая линия, заземленная по разные стороны от S-объекта, не может быть использована в качестве источника. Очевидно, что в этом случае наиболее подходящим является точечный источник (метод заряда). И наоборот, при изучении Т-объектов источник - линия с расположением электродов по разные стороны от высокоомного пласта - является наиболее оптимальным. Отсюда, между прочим, следует, что поле короткой линии, заземленной сверху на кровле Т-объекта и сразу под ним является полностью, на 100%, аномальным. Было бы ошибкой, однако, считать, что так и нужно работать. Хотя аномальный эффект велик настолько, насколько это вообще возможно, но он определяется в основном величиной поперечного сопротивления Т-объекта, но не его протяженностью, что является обычно самым интересным. Математическое моделирование показывает, что для максимального проявления края Т-объекта нужно значительно разносить заземления линии по вертикали. Так что, обоснование выбора источника, приведенное выше, хотя справедливое, но слишком общее и нуждается в дальнейшем уточнении в зависимости от типа вмещающей среды и цели работ.

Вообще, учет вмещающей среды при выборе приемно-питающей установки и интерпретации результатов наблюдений в целях оконтуривания объекта является важнейшим делом, которому часто не уделяется должного внимания. Визуализация и интерпретация зачастую производятся на основе представления о вмещающей среде, как об однородном проводящем полупространстве. Однако, особенно при работах на нефть и газ, мы имеем дело нередко с изолирующим фундаментом. Наличие непроводящего основания радикально влияет на распределение токов в среде и, в случае применения вертикальной линии, это влияние имеет принципиальный характер.

Рассмотрим поведение полей точечного источника и линии в однородном слое с изолирующим основанием.

Распространение тока точечного источника в среде с изолирующим основанием характеризуется тем, что уже на небольших удалениях от электрода (при $r > h$, где h - глубина залегания основания) ток течет практически горизонтально с почти равномерным распределением по вертикали. В этой области разностей (зона S) измеряемая на дневной поверхности компонента электрического поля E_r близка к своему асимптотическому значению при $r \rightarrow \infty$:

$$E_r = \frac{I}{2\pi r S}, \quad (3)$$

где I - величина тока, S - суммарная продольная проводимость разреза, r - расстояние от источника по горизонтали. Формулой (3) легко воспользоваться для того, чтобы получить выражение для аномальной части поля, если объектом является протяженное проводящее включение (например, часть коллектора, заполненная минерализованной водой). В таком случае

$$E_r = \frac{I}{2\pi r (S_0 + S_a)},$$

где S_0 - суммарная проводимость вмещающей толщи, S_a - продольная проводимость объекта, а аномальная часть есть

$$E_r^a = - \frac{I}{2\pi r (S_0 + S_a)} \cdot \frac{S_a}{S_0} \quad (4)$$

Заметим, что в этой области разностей уже безразлично положение точки заземления источника. Итак, аномальное поле S-объекта от точечного источника в среде с изолирующим основанием при $r > h$ почти линейно зависит от проводимости объекта и спадает по разному, как I/r .

Совершенно иначе ведет себя аномальное поле Т-объекта, допустим, это будет Т-плоскость, от точечного источника. Аномальное поле Т-плоскости определяется вертикальной компонентой электрического поля, которое в среде с изолирующим основанием при больших r ($r > h$) можно представить как

$$E_z \sim \sqrt{\frac{h}{2r}} \cdot \exp \left(- \frac{\pi r}{h} \right).$$

Можно ожидать, что и аномальное поле Т-объекта зависит от разности по этому же закону. Выполненные расчеты подтверждают это. Учитывая, что нормальное поле (3) спадает, как I/r , мы должны заключить, что использование точечного источника в среде с изолирующим основанием с целью оконтуривания тонкого объекта повышенного сопротивления лишено смысла еще в большей мере, чем если бы вмещающая среда была неограниченным снизу полупространством.

Нормальное поле вертикальной электрической линии в среде с изолирующим основанием само спадает с разностью экспоненциально. При $r > 3h$ радиальная компонента электрического поля на дневной

поверхности выражается зависимостью

$$E_r = c \cdot \frac{I\rho_0}{4\pi} \cdot \sqrt{\frac{h}{2r}} \cdot \exp\left[-\frac{\pi r}{h}\right], \quad (5)$$

где c — коэффициент, определяемый геометрическим положением источника в пласте и не зависящий от r и ρ_0 . Численный анализ показывает, что аномальное поле Т-объекта от вертикальной линии также подчиняется экспоненциальному закону, но спад происходит медленнее, чем в (5). Так что, вертикальная электрическая линия с заземлением выше и ниже Т-объекта — оптимальный источник в среде с изолирующим основанием.

2. Визуализация положения края объекта по профильным наблюдениям.

Традиционный прием извлечения наглядной информации из электроразведочных данных заключается в трансформации в кажущиеся величины. Трансформация производится путем сопоставления данных и результатов математического моделирования. Причем, в математической модели допускается ряд упрощений. Например, при широко известной трансформации в ρ_{τ} (ЗСБ) игнорируется реальная геометрия приемно-питающей установки, упрощается описание процесса становления (процесс рассматривается, как протекающий только в поздней стадии), наконец, среда принимается однородной. В методах постоянного тока обычно применяется трансформация в ρ_k , при которой учитывается геометрия приемно-питающей установки, но среда рассматривается однородной. Это вполне оправдано в наземной электроразведке. Но в наземно-скважинной разные элементы приемно-питающей установки могут иметь совершенно различную геоэлектрическую окрестность. В таких условиях резкое несоответствие между реальным разрезом и базовой моделью трансформации (однородным полупространством) приводит к широкому диапазону изменений ρ_k , и визуализирующая способность кривой ρ_k по отношению к тонкой задаче выделения края практически не возрастает (по сравнению с самой кривой э.д.с.). Конечно, и в этих условиях можно пытаться реализовать идею трансформации в кажущиеся на основе сложной базовой модели, учитывающей подробно вмещающую среду, при этом определять, как кажущееся, сопротивление горизонта, в котором находится интересующий объект. Однако, это

технически сложная процедура, к тому же сталкивающаяся с проблемой корректности.

Мы предлагаем другой способ трансформации наблюдаемой по профилю кривой э.д.с., в котором учитывается полностью вмещающая среда и конфигурация приемно-питающей установки. Суть предлагаемого способа, согласно [1], состоит в том, что с целью визуализации нарушений горизонтальной однородности, наблюдаемое поле по профилю нормируется на рассчитанное поле вмещающей горизонтально-однородной среды (для той же установки, естественно), а получившаяся нормированная функция дифференцируется по положению приемной установки (разносу). Если $E(r)$ - наблюдаемое поле (потенциал, градиент или разность потенциалов), а $E^0(r)$ - соответствующее нормальное поле, то рассматривается функция

$$M(r) = \frac{E(r)}{E^0(r)}, \quad (6)$$

и положение края протяженной геоэлектрической неоднородности отражается в виде экстремумов на кривой

$$\frac{\partial}{\partial r} M(r) = \frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{E(r)}{E^0(r)} \right] \quad (7)$$

Успех этой процедуры весьма зависит от того, насколько полно отражена вмещающая среда в нормирующей функции $E^0(r)$. Идеально было бы следовать принципу "все, кроме самого объекта", однако на практике наши сведения о разрезе могут быть неполными (впрочем, сейчас речь идет о наземно-скважинной электроразведке) или мы не хотели бы (или не имеем возможностей) производить сложные расчеты - в таком случае можно воспользоваться упрощенным разрезом или даже использовать асимптотическими выражениями для поля.

3. Математическое моделирование.

Приведем несколько примеров предлагаемой визуализации, воспользовавшись результатами математического моделирования. На рис.1а представлен двухслойный разрез (ρ, h) с непроводящим основанием. На глубине $0.8h$ помещен Т-объект - диск с поперечным сопротивлением $T=h\rho$. Источник - линия на оси диска, заземленная на глубине $0.7h$ (над диском) и $0.9h$ (под диском). Здесь же изображены кривые нормального (без диска) и суммарного градиента по профилю на дневной поверхности. Как видно, кривая суммарного поля похожа на кривую нормального и не отражает в явном виде край диска. На

рис.1б мы видим нормированную кривую (функцию M), которая имеет характерный вид, переходя с одной "полки" на другую. И наконец, дифференцирование этой кривой (здесь $\Delta(5 \cdot E_r / E_r^0) / \Delta r$) дает положение края четким максимумом.

На рис.1б фиксируется положение края проводящего диска в поле точечного источника, причем в качестве нормирующей функции используется асимптотическое выражение (3). На рис.1з представлена серия кривых для дисков с различными радиусами ($R/h=1,2,3,4,5$) в двухслойной среде с изолирующим основанием в поле линии. Здесь также используется асимптотическое выражение для линии в двухслойной среде (5). Кривая 0 соответствует трансформации полного нормального поля. Ее можно рассматривать, как "шум", вносимый заменой полного поля асимптотикой (5). В данном случае "шум" существенно меньше значений трансформант над краем. Кривая ∞ соответствует Т-плоскости и не образует локальных экстремумов.

В условиях Восточной Сибири характерным является наличие мощной соленосной толщи. Здесь, разумеется, необходимо заземлять источник ниже этого горизонта, но, поскольку измерения проводятся на дневной поверхности, возможности прослеживания нижних горизонтов уменьшаются. На рис.1д кривая градиента, полученная математическим моделированием, для двухслойного разреза ($\rho_2=\infty$), содержащего диск S ($S=h/\rho$) в основании, перекрытый Т-плоскостью ($T=5h\rho$), трансформирована по предлагаемой нами схеме. Здесь нормальная среда, использованная для расчета нормирующей функции, включает в себя Т-плоскость. Отметим, что влияние экрана приводит к "размазыванию" максимума.

На рис.1е моделируется ситуация, когда залежь (Т-диск) окружена минерализованной водой (S-кольцо). Источник - точечный, под залежью, у непроводящего основания. За нормальный принят двухслойный разрез ($\rho_2=\infty$). Трансформанта отмечает внутренний и внешний край водносолевого окаймления.

Еще один пример определения края Т-диска при разных положениях источника (линии) относительно края дан на рис.1з.

Заметим, что величины T или S объектов, использованных для иллюстрации на рис.1 велики, но в проведенном нами математическом моделировании уверенно выделялись края объектов, значения S или T которых не превышали 10% от соответствующих значений вмещающей толщи. Моделировалась также ситуация, когда источник заземлялся на обсадную колонну. Показано, что это сильно ухудшало возможность выделения края объекта повышенного сопротивления в условиях

высокоомного разреза (Восточная Сибирь). Кстати сказать, нормальное поле в этом случае должно быть рассчитано для источника, заземленного на колонну.

4. Физическое моделирование.

Для оценки эффективности предлагаемой трансформации было проведено физическое моделирование в значительных объемах. Моделирование проводилось группой под руководством Б.И.Рабиновича (Б.И.Рабинович, В.С.Могилатов, Н.Н.Тарло). Для моделирования использовалась баковая установка с электролитом (раствор поваренной соли), в который помещались модели включений с различной проводимостью. Участниками экспериментов была разработана система создания таких моделей. Идея состоит в том, чтобы для создания объекта повышенного сопротивления частично заменить электролит на изолятор, а для создания повышенной проводимости частично заменить электролит на металл (рис.2). При этом возможно получить объемные и плоские анизотропные модели, а также и одномерную "нить" с конечной проводимостью (обсаженная скважина). Практически, использовались плоские модели для создания Т-объекта (сверленная гетинаксовая пластина) и S-объекта (набор квадратных свинцовых пластинок). Формулы для определения эффективного удельного сопротивления таких объектов весьма просты (на рис.2).

На рис.1ж приведен один пример бакового моделирования. Среда представлена слоем электролита мощностью $h=0.1\text{ м}$ с удельным сопротивлением $\rho=0.05\text{ Ом}\cdot\text{м}$. На кровле изолирующего основания помещен объект пониженного сопротивления, выполненный в виде прямоугольной пластины $0.3 \times 0.46\text{ м}$ из плоских квадратиков свинца с эффективной продольной проводимостью 0.56 Сим . Питакщий электрод, выполненный из свинца, погружался на глубину $0.8h$, второй относился на "бесконечность". По профилю проводились измерения приемной линией длиной 1 см со свинцовыми электродами с шагом 1 см . Результаты измерений трансформировались по предлагаемой схеме, причем, в качестве нормального поля рассчитывалось поле среды, содержащей S-плоскость с той же проводимостью, что и проводимость объекта. Трансформанта, как видим, весьма четко определяет край неоднородности своими экстремумами и кажется, что имеется еще большой "запас" для меньших значений проводимости объекта.

Закключение.

Мы предложили и продемонстрировали способ трансформации профильных наблюдений, который, на наш взгляд, имеет ясные физические предпосылки. На первом этапе мы нормируем экспериментальные данные на максимально приближенный теоретический аналог в рамках слоистой модели. Эта операция убирает прямое влияние источника и выравнивает наблюдения над горизонтально-однородными участками разреза. Таким образом, подготовлен и обоснован следующий шаг - дифференцирование, которое теперь подчеркнет участки над неоднородными участками разреза. Успешность этих действий, разумеется, обусловлена правильным выбором установки. Наконец, мы, в особенности, рекомендуем предлагаемую трансформацию в условиях плохопроводящего основания.

ЛИТЕРАТУРА

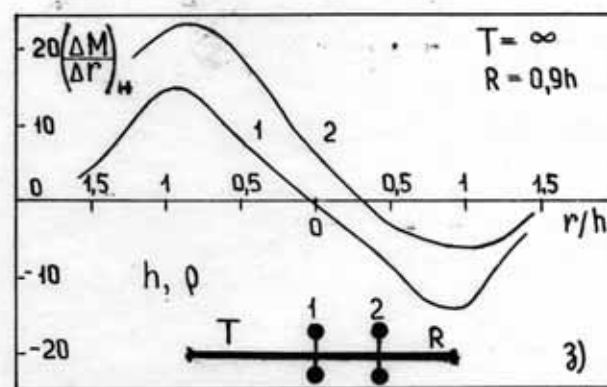
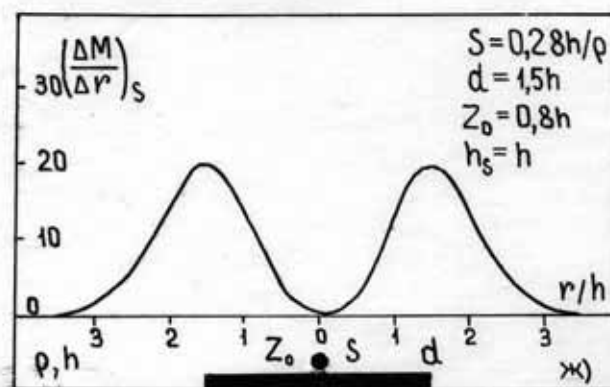
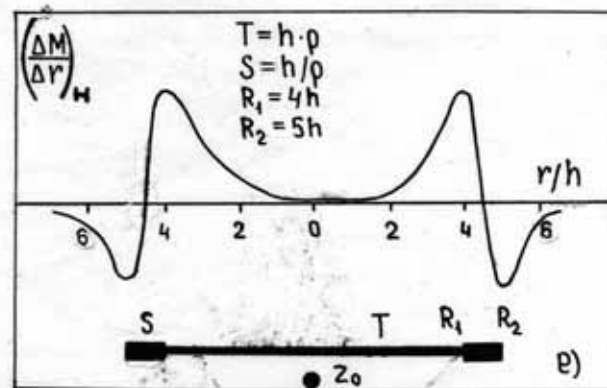
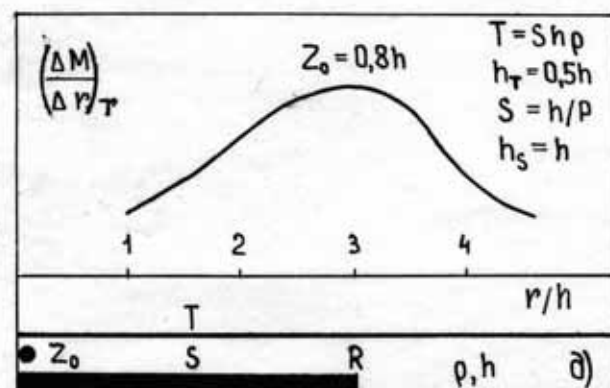
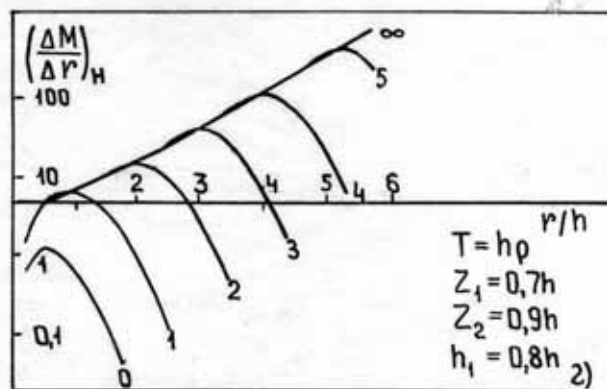
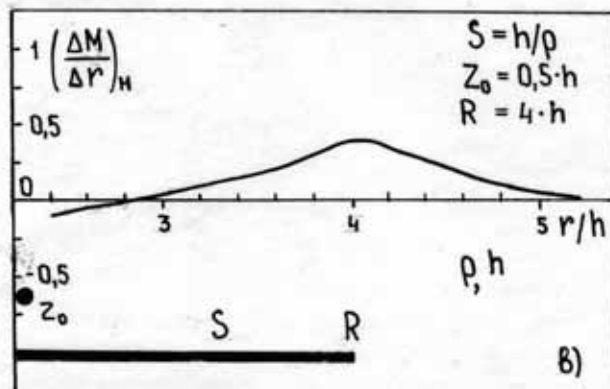
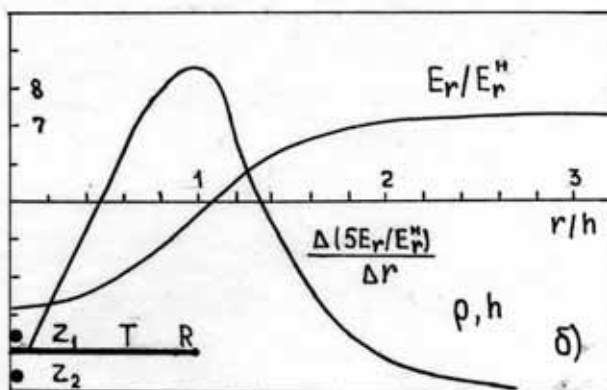
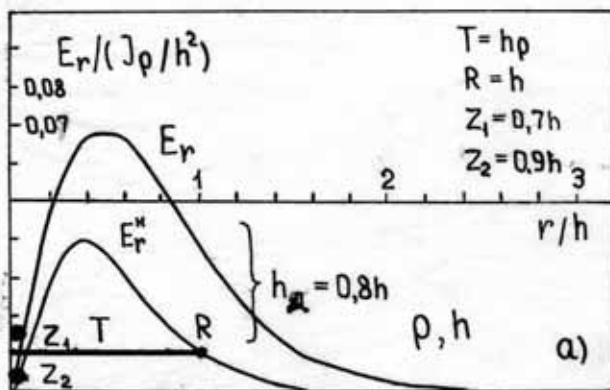
- I А.с. N I664042 (СССР). Способ определения края протяженной геоэлектрической неоднородности /Могилатов В.С. 1991.



СПИСОК РИСУНКОВ

Рис.1. Визуализация края объекта по результатам математического и физического моделирования.

Рис.2. Модели сред повышенного и пониженного сопротивления для бака.



Рес 1
 Мориматов В.С. 1023
 "Об одном способе..." 1.1.53кз

	Анизотропный объект повышенного сопротивления. Сверленный изолятор, погруженный в электролит ($\rho_{\text{э}}$) $\rho_{\text{с}} = \rho_{\text{э}} \cdot a_{\text{с}}^2 / \left[\frac{\pi \cdot d_{\text{с}}}{2} \right]^2$ $s = x, y, z$	Анизотропный объект пониженного сопротивления. Набор из металла, погруженный в электролит ($\rho_{\text{э}}$) $\rho_{\text{с}} = \rho_{\text{э}} \cdot d_{\text{с}} / (d_{\text{с}} + a_{\text{с}})$
Объемные		
Плоские		
Линейные		

Рис.2.

Можинатов В