Записки Ленинградского ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красного Знамени горного института им. Г.В.Плеханова,
1984, т. 101

УДК 550.837

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТЕНЦИАЛА ДВОЙНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СЛОЯ НА ДНЕВНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Н.В.СЕМЕВСКАЯ

Метод естественного поля широко используется в разведочной геофизике для обнаружения рудных месторождений. В последнее время этот метод стал использоваться и для изучения геологических объектов с низкой электропроводностью, т.е. нерудных месторождений. Вблизи них были обнаружены электрические естественные поля, которые вызывали аномалии электрического потенциала на поверхности [2]. Механизм возникновения диффузионного потенциала хорошо известен и заключается в том, что в результате диффузии ионов диссоциированных солей из области с большой концентрацией раствора в область с меньшей концентрацией с обеих сторон границы раздела накапливаются заряды разных знаков, образующие двойной электрический слой. Мощность слоя обуславливается электрохимической активностью раствора. Скачок потенциала на этом слое и носит название диффузионного потенциала. В естественных условиях следует ожидать диффузионных полей вблизи пород, хорошо растворимых в воде. В работе [1] приведены значения потенциалов для различных контактов. Для слабого раствора $NaCl$ при температуре 18 °С диффузионный потенциал

$$\Delta\varphi = -11{,}6 \lg \rho_1/\rho_2 = \tau/\varepsilon,$$

где ρ – удельное сопротивление растворов с разных сторон слоя; ε – диэлектрическая проницаемость; τ – мощность слоя.

Из сказанного следует, что все аномалии потенциала на поверхности земли, вызванные наличием диффузионных полей, должны описываться выражениями для электрического поля двойных электрических слоев различных размеров и конфигурации при условии, что эти поля не маскируются более сложными электрическими полями другого происхождения. Поэтому определенный интерес представляют аналитические выражения и графические картины полей от типовых двойных слоев, конфигурация которых близка к естественным случаям. Наличие таких данных может быть весьма полезным при интерпретации результатов полевых измерений.

Рассмотрим изменение потенциала электрического поля двойного слоя для нескольких простейших случаев. Известно [1], что потенциал двойного слоя $\varphi = \pm\frac{\tau}{\varepsilon}\Omega$, где Ω – телесный угол, под которым из данной точки виден двойной слой. Обычно потенциал измеряется с помощью идеального электрода вдоль профиля, проведенного на поверхности земли. Поэтому нас

тоже будет интересовать изменение потенциала двойного слоя вдоль некоторых специально выбранных прямых, проходящих над слоем. В направлении, перпендикулярном плоскости чертежа, слой будем считать бесконечным.

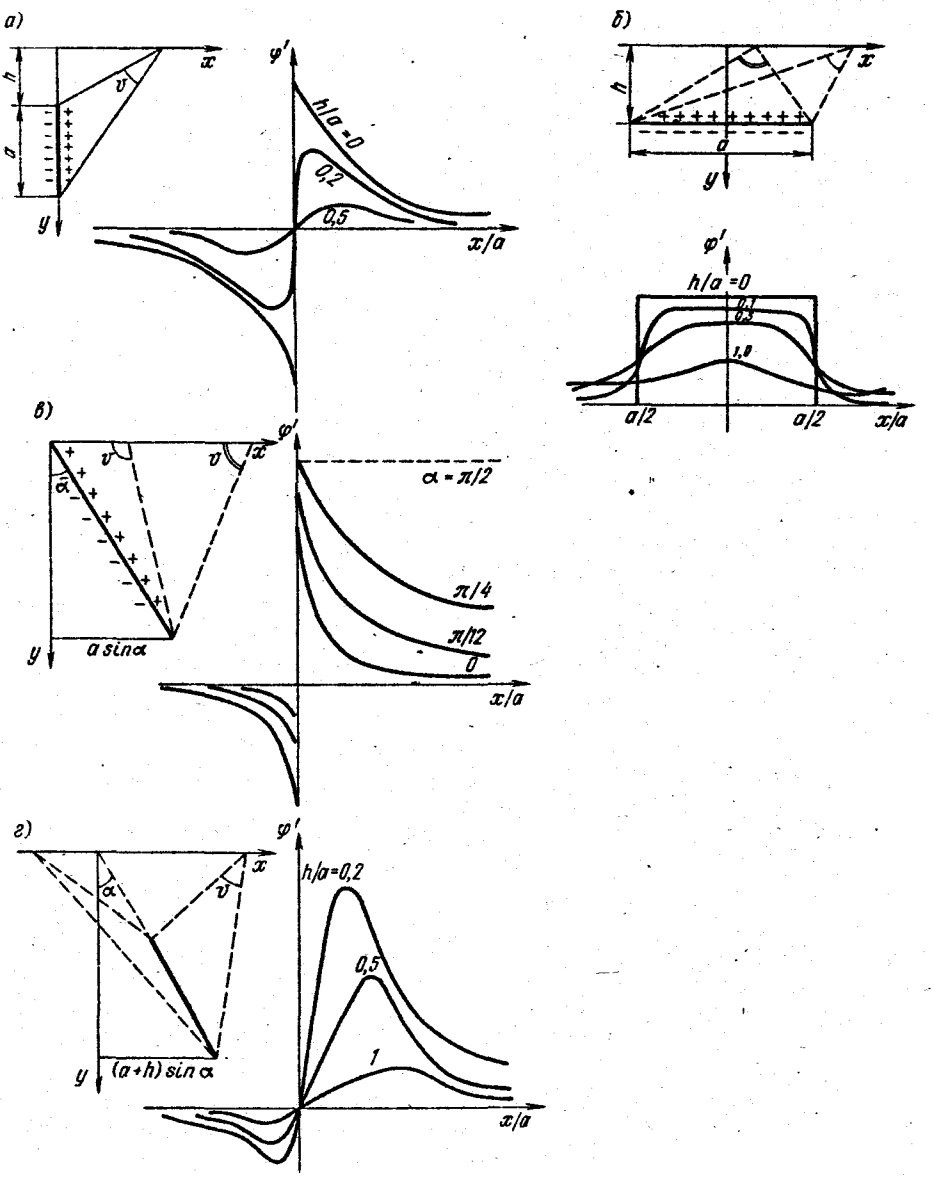


Рис.1. Расположение слоя и соответствующий приведенный потенциал вдоль дневной поверхности: а - вертикальный слой; б - горизонтальный слой; в - наклонный слой; г - наклонный слой, расположенный ниже дневной поверхности

В е р т и к а л ь н ы й с л о й (рис.I,а). Вычислим потенциал вдоль профиля, совпадающего с осью абсцисс. Телесный угол $\Omega = 4\pi \frac{\vartheta}{2\pi} = 2\vartheta$, где ϑ – угол, под которым из точки x виден слой.

Так как, согласно рис.I,а,

$$\vartheta = \operatorname{arctg}\frac{a+h}{x} - \operatorname{arctg}\frac{h}{x} = \operatorname{arctg}\frac{\frac{x}{a}}{\left(\frac{x}{a}\right)^2 + \frac{h}{a}\left(1+\frac{h}{a}\right)},$$

тогда приведенный относительный потенциал определяется выражением:

$$\varphi' = \frac{\varphi}{\Delta\varphi} = \frac{1}{2\pi}\operatorname{arctg}\frac{\frac{x}{a}}{\left(\frac{x}{a}\right)^2 + \frac{h}{a}\left(1+\frac{h}{a}\right)}. \qquad (I)$$

Если профиль, вдоль которого ведется вычисление, проходит через край слоя ($h/a = 0$), то потенциал в точке пересечения слоя имеет скачок на $\Delta\varphi = \tau/2\varepsilon$. Если профиль проходит выше края слоя ($h/a \neq 0$), то скачка потенциала не наблюдается, а в точке пересечения продолжения линии слоя и профиля $\varphi = 0$ кроме того появляются два экстремума, величина которых тем больше, чем меньше отношение h/a, т.е. чем больше протяженность слоя и чем ближе он расположен к профилю отсчета потенциала. Для слоев, глубоко расположенных и малой протяженности, экстремумы слабо выражены и будут наблюдаться на большом расстоянии от слоя. Появление экстремумов можно объяснить тем, что при $x/a \to -\infty$ $\varphi \to 0$ и при $x/a = 0$ $\varphi = 0$, поэтому существует какое-то промежуточное значение координаты точки наблюдения x/a, в которой слой будет виден под максимальным углом.

Если экспериментально снятая зависимость $\varphi = f(x)$ совпадает по характеру с теоретическими кривыми (рис.I), то по любым трем точкам этой зависимости можно с помощью выражения (I) найти геометрические величины a, h слоя и его мощность.

Г о р и з о н т а л ь н ы й д в о й н о й с л о й (рис.I,б). При $(x/a)^2 + (h/a)^2 - 1/4 \geq 0$

$$\varphi' = \frac{1}{2\pi}\operatorname{arctg}\frac{h/a}{\left(\frac{x}{a}\right)^2 + \left(\frac{h}{a}\right)^2 - \frac{1}{4}}, \qquad (2)$$

при $(x/a)^2 + (h/a)^2 - 1/4 \leq 0$

$$\varphi' = \frac{1}{2\pi}\left[\pi + \operatorname{arctg}\frac{h/a}{\left(\frac{x}{a}\right)^2 + \left(\frac{h}{a}\right)^2 - \frac{1}{4}}\right]. \qquad (3)$$

Если профиль отсчета проходит вдоль слоя ($h/a = 0$), то вне слоя $\varphi = 0$; при $x/a = 0{,}5$ происходит скачок потенциала на $\Delta\varphi = \tau/2\varepsilon$, далее потенциал остается постоянным и снова обращается в ноль на обратном конце слоя. Если отсчет ведется при $h/a \neq 0$, то потенциал меняется плавно: чем меньше h/a (слой большой протяженности на малой глубине), тем более плоскую вершину имеет кривая потенциала над слоем; с ростом h/a

потенциал над слоем уменьшается и кривая становится менее плоской. Нарастание потенциала начинается за пределами слоя.

С помощью выражений (2) и (3) и экспериментальной кривой можно легко определить геометрические размеры слоя a и h и его мощность.

Наклонный слой (рис.I,в). При $x = a\sin\alpha$ потенциал вдоль профиля отсчета, совпадающего с осью x,

$$\varphi' = \frac{1}{2\pi}\operatorname{arctg}\frac{a\cos\alpha}{x - a\sin\alpha} = \frac{1}{2\pi}\operatorname{arctg}\frac{\cos\alpha}{\frac{x}{a} - \sin\alpha}; \qquad (4)$$

при $0 < x < a\sin\alpha$

$$\varphi' = \frac{1}{2\pi}\left[\frac{\pi}{2} + \operatorname{arctg}\frac{\sin\alpha - \frac{x}{a}}{\cos\alpha}\right];$$

при $x < 0$

$$\varphi' = -\frac{1}{2\pi}\operatorname{arctg}\frac{a\cos\alpha}{|x| + a\sin\alpha}.$$

При $\alpha = 0$ (рис.I,в) кривая потенциала вертикального слоя при $x/a = 0$ имеет скачок потенциала $\Delta\varphi = \tau/2\varepsilon$. С увеличением α нарушается симметрия кривой, разрыв потенциала при $x/a = 0$ остается равным $\tau/2\varepsilon$, но значения потенциала при $x < 0$ и $x > 0$ уже не равны. Это объясняется тем, что при прохождении через слой в точке $x/a = 0$ справа, мы видим слой под углом $\Omega = \pi/2 + \alpha$, а при прохождении слева $\Omega = \pi/2 - \alpha$. При $\alpha \to \pi/2$ будем иметь случай горизонтального слоя, расположенного на уровне профиля измерения потенциала.

Искажение симметрии кривой потенциала пропорционально углу наклона слоя. Слой наклонен всегда в ту сторону, где потенциал достигает больших значений, так как с этой стороны слой виден под бо́льшими телесными углами, чем с противоположной стороны.

Наклонный слой, расположенный ниже уровня измерения потенциала (рис.I,г). При $x > (1 + \frac{h}{a})\sin\alpha$

$$\varphi' = \frac{1}{2\pi}\operatorname{arctg}\frac{\frac{x}{a}\cos\alpha}{\left(\frac{x}{a}\right)^2 + \frac{h}{a}\left(1 + \frac{h}{a}\right) - \frac{x}{a}\left(2\frac{h}{a} + 1\right)\sin\alpha}; \qquad (5)$$

при $h\sin\alpha < x < (a+h)\cos\alpha$

$$\varphi' = \frac{\pi}{2} + \operatorname{arctg}\frac{\left(\frac{x}{a}\right)^2 + \frac{h}{a}\left(1 + \frac{h}{a}\right) - \frac{x}{a}\left(1 + \frac{2h}{a}\right)\sin\alpha}{\frac{x}{a}\cos\alpha}. \qquad (6)$$

Значение потенциала с той стороны, в которую отклонен от вертикали слой, значительно превышает значение потенциала с другой стороны. Здесь также бо́льшие значения экстремумов соответствуют слоям бо́льшей протяженности и более близкого залегания. Степень асимметрии кривой определяется отклонением слоя от вертикали.

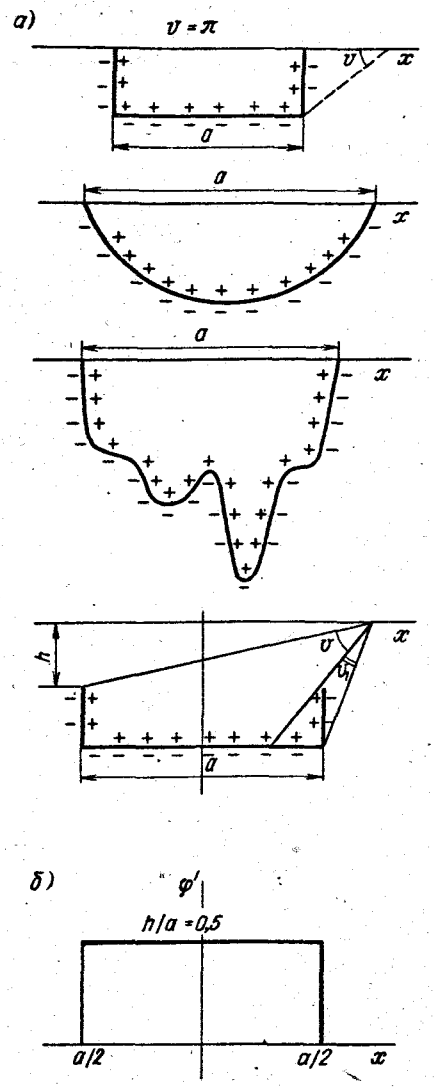


Рис.2. Расположение слоев выпуклой конфигурации (а) и соответствующий приведенный потенциал (б)

С л о й в ы п у к л о й к о н ф и г у р а ц и и (рис.2). Если профиль отсчета потенциала лежит в плоскости контура, ограничивающего слой, то во всех точках вне области слоя он будет виден под углом ϑ. Часть слоя со стороны отрицательных зарядов и часть слоя со стороны положительных зарядов видны под одинаковыми углами, поэтому суммарный телесный угол равен 0 и $\varphi = 0$. Из всех точек внутри слоя будет видна положительная сторона слоя под углом $\vartheta = \pi$, причем конфигурация дна слоя не имеет значения (рис.2,а) и потенциал всех вариантов слоев будет одинаков, если одинакова ширина ограничивающего их контура (рис.2,б).

Если слои залегают на какой-либо глубине h, то картина поля несколько меняется. Часть слоя мы видим под углом ϑ_1: верхнюю стенку со стороны отрицательных зарядов часть горизонтальной со стороны положительных зарядов, поэтому угол ϑ_1 не входит в определение потенциала. Величина потенциала определяется углом ϑ, т.е. углом, под которым виден контур, ограничивающий слой. Тогда задача сводится к случаю горизонтального слоя шириной a на глубине h под уровнем отсчета потенциала. В этом случае при решении обратной задачи – нахождении формы слоев по измеренной кривой – мы сталкиваемся с некоторой неоднозначностью. Однако на практике такие случаи встречаются довольно редко, а определение размеров a и h этих слоев дает уже о них достаточную информацию.

Как известно, контакты вод с различной минерализацией имеют широкое распространение на объектах проведения гидромелиоративных работ на засо-

ленных участках, в областях разгрузки минеральных вод и других объектах [3]. В этих условиях интерпретация метода естественного электрического поля может быть выполнена более полно и значительно облегчена при использовании вышеприведенных расчетов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Нейман Л.Р., Демирчан К.С. Теоретические основы электротехники. Л., Энергия, 1975.

2. Семенов А.С. Электроразведка методом естественного электрического поля. Л., Недра, 1968.

3. Шарапов Н.Н., Черняк Г.Я., Барон В.А. Методика геофизических исследований при гидрогеологических съемках с целью мелиорации земель. М., Недра, 1974.