

Наил Заляев, Tadeusz Rokosz

О ВОЗМОЖНОСТЯХ УЛУЧШЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО  
КАРОТАЖА ПЛАСТОВ В СЛОЖНЫХ  
ГЕОЛОГИЧЕСКО-ТЕХНИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

(5 фиг.)

*The possibilities of improvement in electric logging*

(5 Figs)

*O możliwościach usprawnienia profilowań elektrycznych*

(5 fig.)

Abstract: In all practically used electrical resistivity logging methods the potential is to be measured under the constant current intensity. However, the authors found that in salty muds the conductivity (or resistivity) is characterized not by the potential but by the intensity of the current leaking from the bore-hole to the beds. Therefore in such conditions the optimal solution is to register the current intensity changes, the feeding voltage being stabilized, but not convertly.

In the paper the theory of the electric field in the bore-hole has been discussed and the measuring device to log the current leakage presented, as well as the examples of its use.

Presented device is very simple and easy to use. It does not require practically any particular electronic equipment and it is possible to construct it of standard electric logging tools, just by simple combination of electrodes. The device has the vertical resolution of the same class as laterolog, but eliminates the unwanted effects of surrounding beds.

The mentioned device has been found very practical one, and is widely used in salty muds, particularly in the Permian Basin on the Fore Sudetic Monocline (Poland).

Повсеместно применяемым методом электрического каротажа является в настоящее время каротаж с использованием потенциал — зондов и градиент — зондов (метод КС), а в последнее время также боковой каротаж (БК). Каротаж с использованием потенциал — зондов и градиент — зондов применяется для небольших отношений  $\rho/\rho_{б.р.}$  и для пластов с большими мощностями —  $h > 1,5$  длины зонда (М. Бондаренко, А. С. Кашик и др., 1971). В таких условиях этот каротаж действительно даёт удовлетворительные результаты.

Однако описываемые зонды неудовлетворительно дифференцируют разрезы в условиях  $\rho/\rho_{б.р.} > 100-200$ , которые характерны для скважин с солёным буровым раствором, особенно в случае пластов малой мощности. В Польше, в наиболее перспективных районах, частыми являются именно такие условия (Предсудетская моноклиналь).

Применяется там боковой каротаж (БК). Однако он не обеспечивает достаточной точности измерения низких сопротивлений ( $\rho < 1$  ом) и часто искажён экранными эффектами от вышележающих высокоомных серий. Кроме того, глубинные приборы для БК имеют очень сложную электронную систему, что затрудняет их применение, особенно при высоком давлении и температуре. В связи с этим целесообразно рассмотреть возможности повышения эффективности электрического каротажа в случае солёных буровых растворов.

Исходными для этой работы были теоретические и экспериментальные исследования характера электрического поля в условиях среды, когда скважина заполнена раствором, сопротивление которого значительно ниже, чем сопротивление пробуренных пород. Определение электрического сопротивления в геофизике опирается на известной формуле:

$$\rho = K \frac{U}{I} \quad (1)$$

Использование этой формулы для определения сопротивления сводится к измерению потенциала  $U$  при искусственном поддержании  $I = const$  ( $K$  — коэффициент зонда).

В то же время из анализа свойств электрического поля в среде, пробуренной скважиной вытекает, что в определённых условиях целесообразно измерение тока, истекающего из скважины в окружающую среду. Такие условия характерны для скважин, заполненных солёным буровым раствором. В этом случае из-за высокой электрической проводимости раствора, вызывающей шунтирующее действие, потенциал вдоль оси скважины меняется очень слабо. Его величина только незначительно зависит от сопротивления отдельных пластов, а главным образом определяется суммарной электрической проводимостью всей серии пластов.

В то же время сила электрического тока, истекающего из скважины в горные породы, изменяется очень сильно, причём эти изменения строго соответствуют изменениям проводимости отдельных пластов. Это явление именно и наблюдается при измерениях  $I$  и  $U$  в скважинах.

На рис. 1 показан график  $U$ , который представляет изменение потенциала цилиндрического электрода длиной  $L = 3$  м, который питается

Фиг. 1. Сопоставление графика изменений потенциала цилиндрического электрода с кривыми сопротивления; P<sub>Ost</sub> — БК; P<sub>Pu</sub> — КПБ

Fig. 1. Krzywa zmian potencjału elektrody cylindrycznej  $U_A$  — w zestawieniu z krzywymi oporności

$M_{8,0} A_{0,1} B$

$PO_{st}$

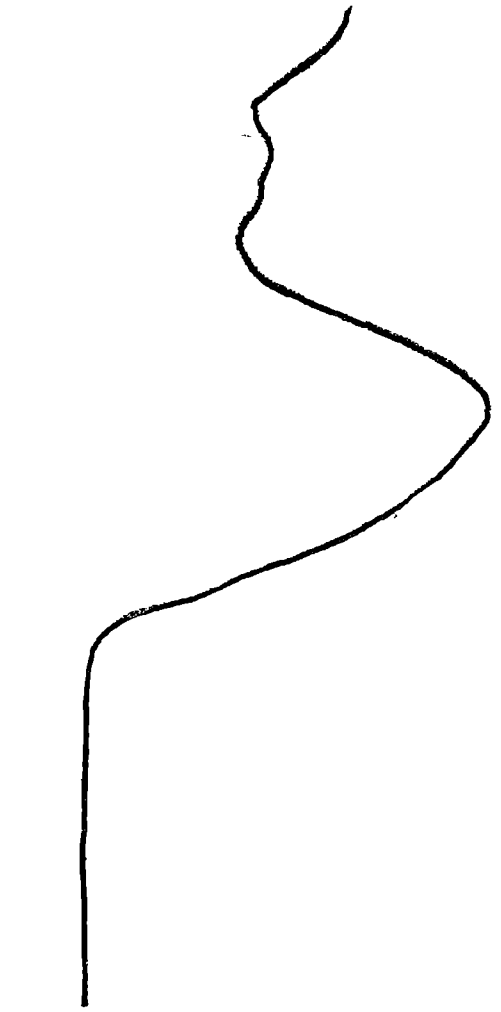
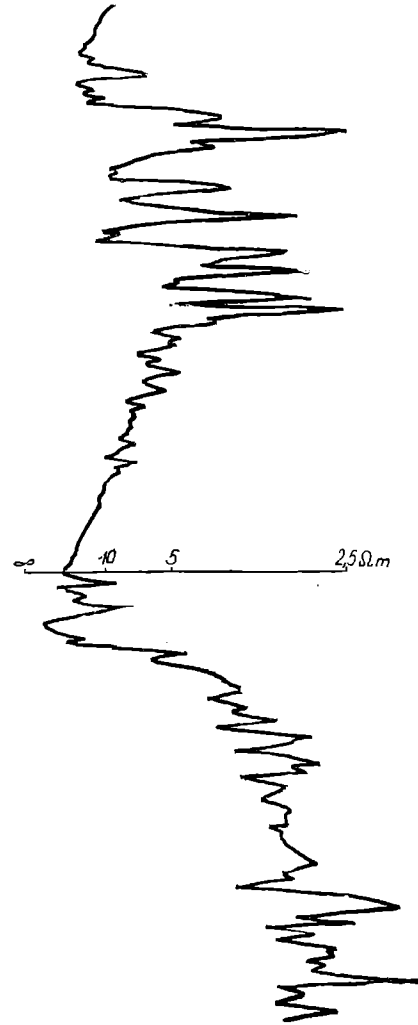
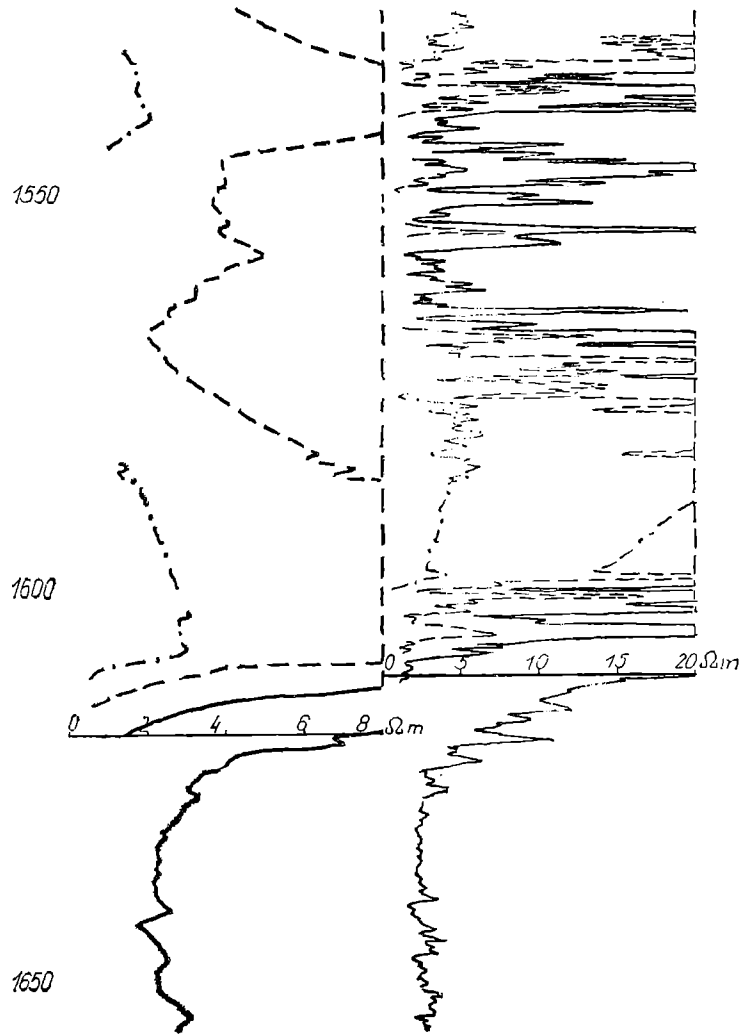
$PP_u$

KRZYWA  $U_A$

0	10	20	30	0	50	100	150	200 $\Omega \cdot m$
0	50	100	150	0	250	500	750	1000 $\Omega \cdot m$
0	250	500	750	0	1250	2500	3750	5000 $\Omega \cdot m$

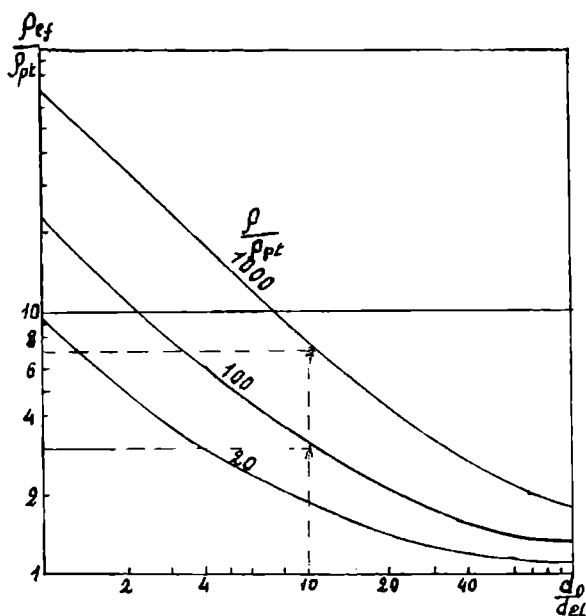
$\infty$  20 60 30 15 7,5  $\Omega \cdot m$

$\rightarrow \Delta U_A \text{ m}$



электрическим током с постоянной напряжённостью. Из рисунка видно, что заметные изменения потенциала наблюдаются только напротив высокоомных серий с большими мощностями. В это время на графике  $U$  не проявляется влияние отдельных пластов, заметных по диаграммам БК и других видов каротажа. Подобные явления можно также наблюдать по материалам, приведённым в работе (В. В. Гречухин, Э. А. Нейман и др., 1963). Учитывая выше сказанное, а также формулу (1) можно прийти к выводу, что высокая разрешающая способность БК связана с изменениями  $I$  напротив отдельных пластов.

Приведённые выше замечания относились к цилиндрическому электроду. Полезно также рассмотреть изменения потенциала сферического электрода. Конечно, эти изменения ещё слабее, так как большая часть поверхности сферического электрода направлена к оси скважины, а цилиндрического электрода — к её огибающей, т. е. в направлении горной породы. Характер изменений потенциала можно проследить по семейству кривых на рис. 2 (В. Н. Дахнов, 1967). Из него видно, что для отношения  $\frac{d_{\text{СКВ}}}{d_{\text{ЭЛ}}} > 10$  (что типично для скважинных условий), даже при 1000-кратном изменении сопротивления пласта по отношению к сопротивлению бурового раствора, сопротивление электрода не меняется больше чем в восемь раз,



Фиг. 2. Характер изменений сопротивления заземления сферического электрода в зависимости от изменений сопротивления горных пород, пробуренных скважиной

Fig. 2. Charakter zmian oporności uziemienia elektrody sferycznej w zależności od zmian oporności skał przeciętych otworem

а при 100-кратном изменении этого отношения — только в три раза. Изменения потенциала электрода пропорциональны изменениям его сопротивления и поэтому они тоже незначительны.

Очевидно, что в таких условиях целесообразно змерять изменения тока, истекающего из скважины к отдельным пластам. Наперекор этому во всех известных приборах для разных видов бокового каротажа и в обыкновенных зондах применяется, как правило, измерение потенциала при стабилизированном токе питания ( М. Бондаренко, А. С. Кашик и др., 1971; В. Н. Дахнов, 1967; Г. Ж. Долл, 1951; С. Г. Комаров, 1961; Пирсон сильвейн, 1963) либо, в лучшем случае, регистрируются  $I$  и  $U$ , после чего

определяется  $\frac{U}{I}$  (В. В. Гречухин, Э. А. Нейман и др., 1963). Единственным до сих пор использованием измерений  $I$  был упрощённый каротаж для целей определения границ слоёв при каротаже углов падения (Т. Роккош, 1968).

В применяемых для БК станциях, наперекор естественным свойствам рассматриваемых величин, измеряется потенциал электродов при стабилизированном токе питания, что вызывает необходимость применения сложной электронной схемы для стабилизации сильно меняющегося тока.

При измерении тока мы получаем величины, пропорциональные проводимости, что на первый взгляд может казаться неудобным в связи с необходимостью использования при этом гиперболической шкалы сопротивления. Однако с методической точки зрения это оказывается полезным и даже более удобным. При такой шкале мы получаем высокую точность записи низких и средних сопротивлений (растянута шкала низких сопротивлений), наиболее пригодных для оценки продуктивных пластов. Верно, что при этом теряется точность записи напротив высокоомных пластов, но это не очень существенно, ибо такие слои в большинстве случаев непроницаемы. Кроме того, если бы даже эти слои оказались коллекторами, то значительное изменение сопротивления, при его больших характерных значениях для слоёв с высокой степенью насыщенности углеводородами соответствует только незначительным изменениям насыщенности.

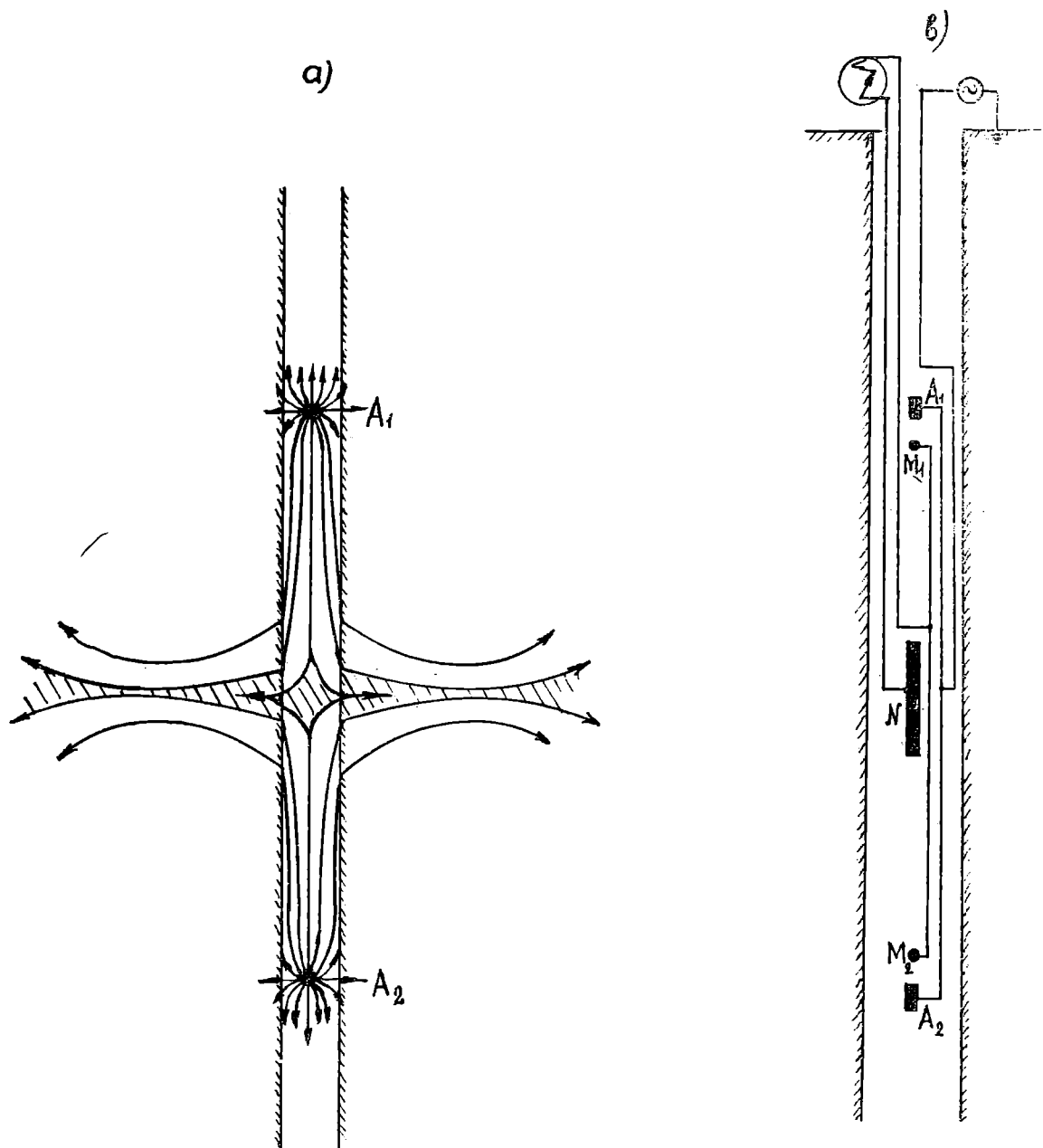
Таким образом, по техническим и методическим причинам, в условиях солёного бурового раствора очевидной является целесообразность измерения  $I$  вместо  $U$ . Проблема сводится лишь к разработке соответствующей методики и техники измерений.

В связи с этим ниже предлагается способ определения проводимости горных пород, опирающийся на измерении тока, истекающего из той части скважины, которая ограничена двумя электродами, подключёнными к одному и тому же полюсу.

Зонд для этой цели (рис. 3б) состоит из: двух питающих электродов  $A$  и  $A'$ , замкнутых между собой накоротко; расположенных между ними трёх измерительных электродов, из которых два ( $M$  и  $M'$ ) взаимно замкнуты накоротко и образуют одну измерительную точку  $M$ ; посередине между ними находится электрод  $N$ , который представляет собой другую измерительную точку.

Определение проводимости заключается в измерении разности потенциа-

лов  $\Delta U = U_{MM} - U_N$  при истекании тока с электродов  $A_1 A_2$ . При  $\rho_{б.р.} \ll \rho_{г.п.}$  на определённом участке скважины ток течёт от  $A_1, 2$  к центру измерительной установки почти параллельно к оси скважины (рис. 3а). Опыт показал,

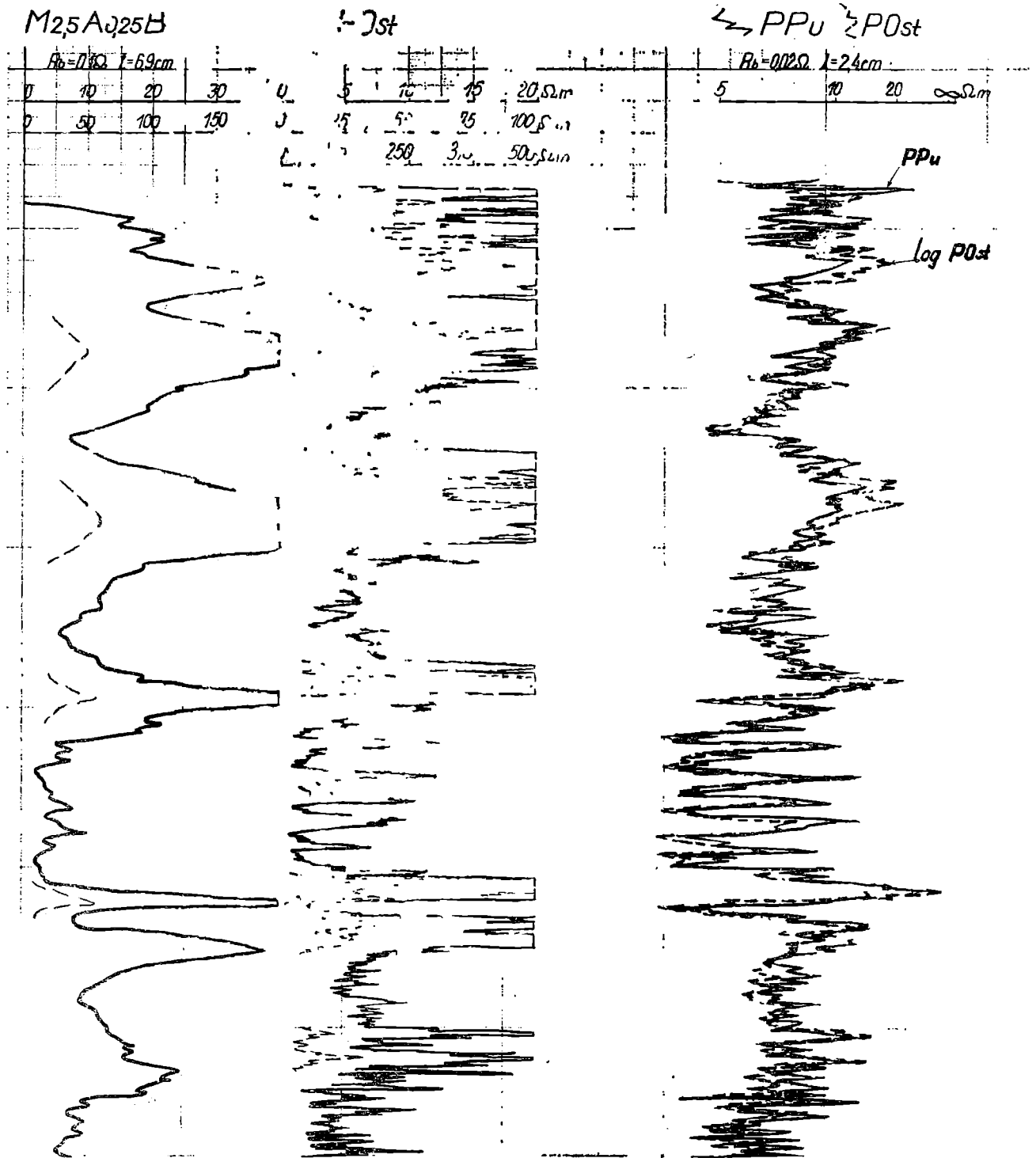


Фиг. 3. Схематический вид электрического поля в среде, пробуренной скважиной, которая заполнена хорошо проводящим раствором (а) и схема зонда для каротажа проводимости КП (б)

Fig. 3. Schemat pola elektrycznego w ośrodku przeciętym otworem wypełnionym medium dobrze przewodzącym (а) oraz schemat sondy do profilowania przewodności (upływnościowego) (PP<sub>u</sub>) (б)

что такой характер течения тока практически начинается у электродов  $A_1$  и  $A_2$ , на расстоянии близком радиусу скважины от них, и продолжается приблизительно до точек, удалённых от центра зонда на диаметр скважины.

Симметрично расположенные питающие электроды образуют сверху и снизу электрические экраны, направляющие этот ток на дальнейшее ра-



Фиг. 4. Сопоставление кривой каротажа проводимости КП с комплектом геофизических данных; Post — БК; PPU — КП6

Fig. 4. Zestawienie krzywej profilowania przewodności (upływnościowego) (PP<sub>u</sub>) z kompletem pomiarów геофизycznych

диальное течение к проводящим пластам в форме близкой к двухстороннему гиперболоиду вращения. Поэтому при постоянном потенциале электродов  $A_1$  и  $A_2$  сила тока и разность потенциалов между  $M_1, 2$  и  $N$  будут тем большими, чем больше суммарная проводимость горных пород в интервале  $A-A'$ . При нулевой проводимости эта разность потенциалов будет, естественно, минимальной.

Для получения самой хорошей зависимости результатов от проводимости следует, используя описанный характер течения тока в скважине, поместить электроды  $M_1$  и  $M_2$  на расстоянии порядка 1 радиуса скважины от  $A_1$  и  $A_2$  в направлении центра установки, а электрод  $N$  сделать в форме цилиндра длиной порядка 1,5 диаметра скважины.

Аналитически, измеряемые величины выражаются следующим образом: сила тока питания  $I$  определяется по формуле

$$I = U_M \cdot K\sigma_{MN} \quad (2)$$

где:  $U_M$  — потенциал точек  $M_1$  и  $M_2$ ,

$K$  — коэффициент, зависящий от размеров электрода  $N$  и его расстояния от  $A$ ,

$\sigma_{MN}$  — удельная проводимость горных пород.

Полагая, что падение напряжения  $\Delta U_{MN}$  в скважине вызвано, главным образом, током  $I$ , стекающим с электрода  $N$ , что практически справедливо для  $\rho \gg \rho_{б.р.}$ , измеряемая величина  $\Delta U_{MN}$  выражается формулой:

$$\Delta U_{MN} = I \cdot \rho_{б.р.} \cdot \frac{L_{MN}}{\pi r_0^2} \quad (3)$$

Подставляя (2) в формулу (3) получаем:

$$\Delta U_{MN} = K \cdot \frac{L_{MN}}{\pi r_0^2} \cdot \rho_{б.р.} \cdot U_M \cdot \sigma \quad (4)$$

Упорядочивая выражения, получаем следующее: величина  $K$  зависит от поверхности, с которой стекает ток:  $S = 2\pi r \cdot L_N$  и от коэффициента управления  $q$ , т. е.  $K = q \cdot 2\pi \cdot L_N$ .

Подставляя это выражение вместо  $K$  в (4) получаем:

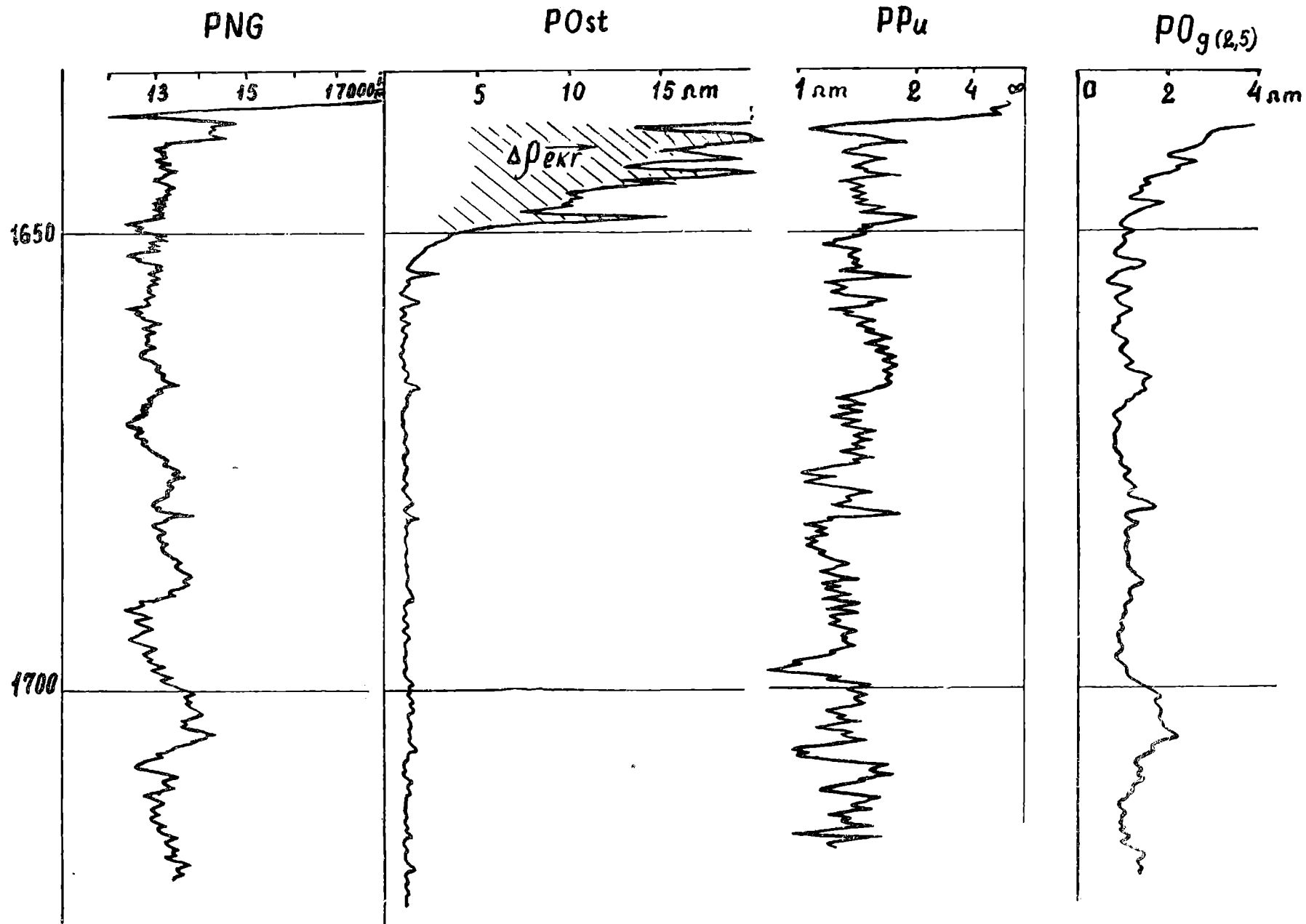
$$\Delta U_{MN} = q \cdot 2\pi r \cdot L_N \cdot \frac{L_{MN}}{\pi r_0^2} \rho_{б.р.} \cdot U_M \cdot \sigma \quad (5)$$

Сокращая формулу и принимая за постоянную зонда  $K$  параметры, которые зависят только от его размеров и геометрии, получаем выражение

$$\Delta U_{MN} = \frac{K}{r} \cdot U_M \cdot \frac{\sigma}{\rho_{б.р.}} \quad (6)$$

Фиг. 5. Сравнение КП с другими кривыми сопротивления в отношении экранирования под высокоомной серией PNG — НГК; Post — БК; PPU — КПб; POg (2,5) — M<sub>2</sub>5A 0,25 в  
Fig. 5. Porównanie PPU z innymi krzywami oporności odnośnie do ekranowania pod serią wysokooporową





из которого видно, что измеряемое  $\Delta U_{MN}$  прямо пропорционально проводимости горных пород напротив центрального электрода  $N$  при условии, что  $U_M = const$ . Это условие выполняется в большинстве интересующих нас разрезов, а нарушается, как это видно из рис. 1 и 2, только в высокоомных сериях с большими мощностями. Только в последних случаях необходима стабилизация  $U_M$ , причём, так как величина  $U_M$  и её изменения очень малы, то для её стабилизации достаточно очень простой схемы.

Практически для песчано-глинистых разрезов (к примеру красный лежень), пробуренных с применением солёного раствора,  $U_M$  достаточно стабильно и  $\sigma$  определяется с достаточной точностью без применения стабилизатора.

Описанный метод испытывался в ряде буровых скважин; некоторые результаты показаны на приведённых рисунках.

Из сопоставления полученных графиков проводимости, обозначенных КП (каротаж проводимости), с БК и другими видами электрокаротажа видно (рис. 4), что конфигурация графиков КП строго соответствует характеру изменений сопротивления вдоль разреза, причём разрешающая способность КП практически такая же, как и БК.

В условиях низких сопротивлений КП, благодаря своей гиперболической шкале, выделяет низкоомные пласты значительно чётче, чем БК (рис. 1 и 5). Дополнительным преимуществом КП является отсутствие экранных эффектов от вышележащих высокоомных пластов, которыми искажены БК и КС (рис. 5). Это преимущество особенно ценно для промысловой оценки газоносности кровельных партий красного лежня и в других аналогичных условиях.

Приведённые рассуждения и материалы по скважинам показывают, что описанный метод обеспечивает существенный прогресс в области улучшения качества записи электрических свойств горных пород в солёных буровых растворах, особенно в случае маломощных низкоомных слёв. Поэтому его необходимо применять в условиях, аналогичных спробованным (красный лежень, главный доломит), а также спробовать его эффективность в других условиях измерений.

*Przedsiębiorstwo Geofizyki Górnictwa Naftowego, 31-429 Kraków, ul. Łukasiewicza 3*

#### Литература

- Бондаренко М., Кашик А. С. и др. (1971), Многоэлектродные зонды с регулируемым полем. *Прикладная геофизика*, вып. 63, „Недра“.
- Гречухин В. В., Нейман Э. А. и др. (1963), Методика применения бокового каротажа на угольных месторождениях печёрского бассейна. *Геофизическая разведка*, Гостоптехиздат.
- Дахнов В. Н. (1967). Электрические и магнитные методы исследования скважин, „Недра“.
- Doll H. G. (1951), The laterolog. *Petrol. Technol.* 11.

- Комаров С. Г. (1963), Справочник геофизика, II, Гостоптехиздат.  
Pirson S. J. (1963), Handbook of Well Log Analysis for Oil and Gas Formation Evaluation. Prentice-Hall, JNC Englewood-Cliffs, N. J.  
Rokosz T. (1968), Geofizyczne profilowanie elementów zalegania warstw w otworach wiertniczych. Akad. Gór.-Hutn., Kraków.

## STRESZCZENIE

Wszystkie stosowane praktycznie metody profilowania oporności elektrycznej polegają na pomiarze potencjału przy stałym natężeniu prądu. W słonych płuczkach wielkością charakteryzującą przewodność elektryczną (lub oporność) wzdłuż otworu okazuje się nie potencjał, lecz natężenie prądu wpływającego z otworu do warstw. W związku z tym, w takich warunkach optymalnym rozwiązaniem jest profilowanie zmian prądu przy stabilizowanym napięciu zasilania, a nie odwrotnie.

W artykule rozpatrzono teoretyczne zasady rozplywu prądu w otworze, przedstawiono układ pomiarowy, służący do profilowania upływności prądu i uzyskane nim wyniki.

Przedstawiony układ jest bardzo prosty i łatwy do stosowania. Układ ten nie wymaga praktycznie wcale specjalnych urządzeń elektronicznych i jest możliwy do wykonania ze standardowych sond elektrycznych, drogą wprowadzenia odpowiednich kombinacji elektrod. Posiada on przy tym pionową zdolność rozdzielczą tej samej klasy co POst, przy czym eliminuje efekty ekranowania, występujące w znanych metodach profilowania polem sterowanym oraz w profilowaniach gradientowych.

Z tych względów omawiany układ okazał się praktycznie bardzo przydatny i znalazł już szerokie zastosowanie praktyczne w płuczkach zmineralizowanych, a szczególnie w utworach cechsztynu i czerwonego spągowa na monoklinie przedsudeckiej.