

## 第2章 TDIP法調査

### 2-1 調査の経緯及び目的

本調査は、オマーン国南バチナコースト地域において地質調査で選定された地区においてTDIP法調査を実施し、鉱床賦存の可能性のある鉱化帯を捕捉することを目的とする。

本年度は第3年次にあたり、平成7年度と平成9年度のパチナコースト地域の調査では、グザイン地区において塊状硫化物鉱床が発見されている。

グザイン地区においては、平成7年度に実施した、グザインイースト地区の東側及びグザインウエスト地区の西側において、新たな鉱床賦存の可能性を把握するためにTDIP法物理探査を実施した。

マケール地区においては、昨年度実施した調査地区の北側で、また、ズーハ及びサラヒ地区では、平成9年度に抽出された鉱徴地の周辺において鉱化帯の分布域を把握し、硫化物鉱床の賦存の有無を推定するためにTDIP法物理探査を実施した。

### 2-2 調査位置及び調査量

本年度の調査地区は、バチナコースト地域の西方に位置するグザイン、マケール、ズーハ及びサラヒの5地区であり、グザイン地区を除けば南バチナコースト地域の西端に位置している。

各地区における調査量をTable II-2-1に示す。

Table II-2-1 Survey amounts of TDIP

AREA	Length(km)	Number of Lines	Number of Points
Ghuzayn(East)	12.4	0.4 km × 6 Lines 2.0 km × 5 Lines	426
Ghuzayn(West)	17.8	2.1 km × 4 Lines 2.3 km × 2 Lines 2.4 km × 2 Lines	600
Maqail	12.0	1.7 km × 1 Lines 2.0 km × 2 Lines 2.1 km × 3 Lines	396
Zuha	34.5	2.0 km × 13 Lines 2.5 km × 1 Lines 3.0 km × 2 Lines	1156
Salahi	21.6	1.0 km × 5 Lines 1.5 km × 7 Lines 1.7 km × 1 Lines 2.2 km × 2 Lines	654
<b>Total</b>	<b>98.3</b>	<b>56 Lines</b>	<b>3232</b>

## 2-3 調査方法

### 2-3-1 測定方法

測定手法は時間領域における IP 法を用いた。大地に金属鉱物などが分布する場合、直流電流を流すと金属鉱物の表面に電荷が蓄えられ、直流電流を遮断すると蓄えられていた電荷が徐々に放出される。比抵抗値と共にこの現象 (IP 効果) を測定することにより比抵抗の変化のみでは検出できない地下の金属鉱床を探索することができる。

本調査では、直流電流として 1/8Hz の休止波形を流し、通電中の受信電位より見掛比抵抗を求め、電流切断後の減衰電位より分極率を測定した。

電極配置は、ダイポール・ダイポール配置とし、電極間隔は 100m、電極隔離係数は  $n=1\sim 4$ 、測線間隔は 200m とした。ダイポール・ダイポール電極配置及び測定データのプロット概念図を Fig. II-2-1 に示す。各測点における測定は、原則としてスタッキング回数を 10 回以上とした。

本調査地域におけるデータの品質は総じて良好であったが、ワジ内の測点の一部において分極率にバラツキが認められたため、必要に応じ再測定を行った。

測定に用いた信号源の出力波形を Fig. II-2-2 に、測定した時間領域データのサンプリング方法を Fig. II-2-3 に示す。

### 2-3-2 使用機器

本調査に使用した測定機器はカナダの Phoenix 社製及びアメリカ合衆国の Zonge 社製送受信システムである。機器の仕様一覧を Table II-2-2 に示す。

Table II-2-2 Specifications of TDIP survey instruments

Receiver	Zonge GDP-16	Phoenix V5
Frequency range	DC to 8KHz	DC to 10KHz
Number of Channels	3	8
Number of Stacks	8096	No restriction
Detectable signal	1 $\mu$ V	1 $\mu$ V
A/D Conversion	16 bits	16bits
Number of Windows	13(from 50 to 1930ms)	13(from 50 to 1550ms)
Transmitter	CH-95A	IPT-1
Output Power	2kw,800v,12A	2kw,800v,10A
Output Frequency	DC to 10KHz	DC to 12KHz
Frequency control	Automatic	Automatic
Generator	Geonics GPU2000	Robin
Maximum output	2Kw	3Kw
Output Voltage	200V	200V
Output Frequency	400Hz	50Hz

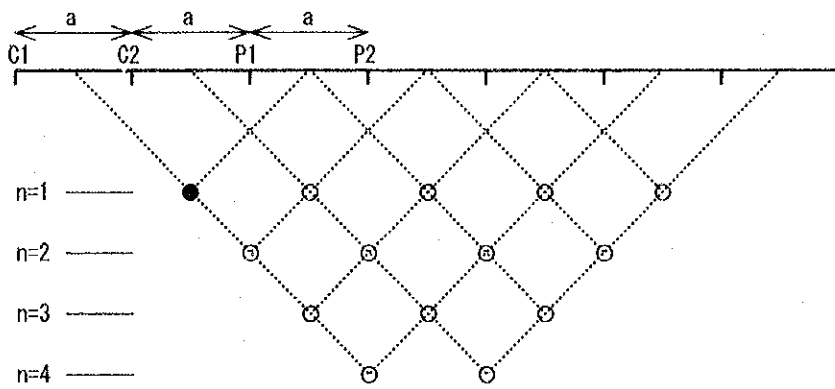


Fig. II -2-1 Dipole-dipole array and plotting procedure

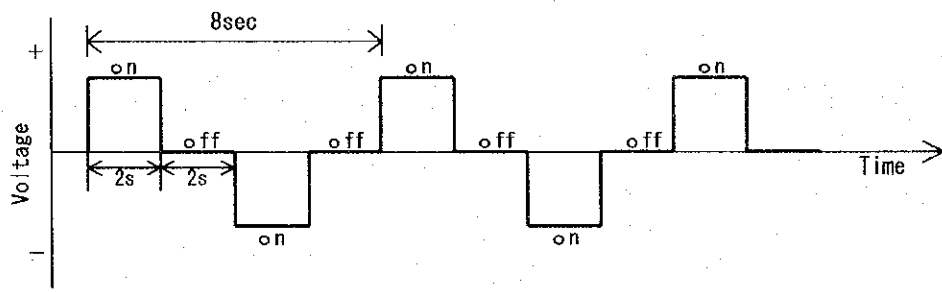


Fig. II -2-2 Waveform produced by the transmitter

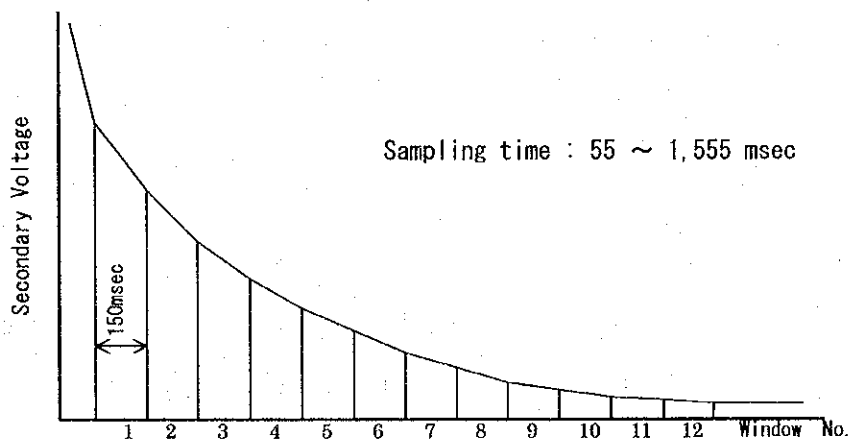


Fig. II -2-3 Sampling interval of the TDIP receiver

## 2-4 解析方法

### 2-4-1 データ処理

本調査に用いた IP 法の電極配置はダイポール・ダイポール配置である。ダイポール・ダイポール配置における大地の見掛比抵抗値 ( $\rho$ ) は、

$$\rho = K \frac{V_p}{I}$$

で表される。ここで  $V_p$  は電流電極 ( $C_1, C_2$ ) 間に周波数 0.125Hz (duty cycle 50%) の電流 ( $I$ ) を供給し、電位電極 ( $P_1, P_2$ ) 間において測定される一次電位である。また、 $K$  は電極配置係数と呼ばれ、一般に次式で表される。

$$K = \frac{2\pi}{\frac{1}{C_1 P_1} - \frac{1}{C_1 P_2} - \frac{1}{C_2 P_1} - \frac{1}{C_2 P_2}}$$

特にダイポール・ダイポール配置で電流電極と電位電極の間隔が電極間の  $n$  倍である場合は、

$$K = \pi a n(n+1)(n+2)$$

と表される。ここで  $a$  は電極間隔である。

また、直流電流通電中の一次電位と、電流切断後 55msec ( $t_1$ ) から 1555msec ( $t_2$ ) までの電位の過渡現象 (二次電位:  $V_t$ ) の時間積分値の比を IP 効果の大きさの指標 (分極率:  $M$ ) としており、次式により表される。

$$M = \frac{1}{V_p} \int_{t_1}^{t_2} V_t dt$$

見掛比抵抗値及び分極率は、測定機に各種測定条件を入力することによりリアルタイムで自動算出される。調査時に、これらデータの品質チェックを行い、測定値がばらつく場合には、再測定を行いデータ品質の向上に努めた。

また、IP 効果を表現する量の一種であるメタルファクター ( $MF$ ) は、上記の見掛比抵抗値及び分極率より、次式により算出される。

$$MF = \frac{M}{\rho} \times 100$$

### 2-4-2 地形補正

測定により得られた見掛比抵抗値は、各電極を無限平面に配置したものとして電極配置係数を仮定し算出されている。しかし本調査地域内には地形の起伏が激しい部分があり、そのような場所における見掛比抵抗値は地形起伏による影響を受けているものと考えられる。

IP 法のダイポール・ダイポール電極配置では、山地形の場所では電流密度が高くなり高比抵抗異常、谷地形の場所では電流密度が疎となり低比抵抗異常が形成される。

そのため、本調査では全測線に対し、二次元有限要素法を用いて地形補正係数を求め、見掛比抵抗値を補正し断面図及び平面図を作成した。

### 2-4-3 2次元モデル解析

IP法の解析には、標準モデルによる見掛け比抵抗分布や分極率分布を参考にしながら断面図および平面図を定性的に解析する定性解析及び推定地下構造モデルを作成しその理論値を計算する定量解析が用いられている。この定量解析は一般にモデルシミュレーションと呼ばれている。

本調査では、有限要素法によるモデル計算 (Forward modeling) と非線形最小2乗法による自動解析法を組み合わせた2次元インバージョン解析法を使用した。地下構造が水平多層構造で近似できない場合、測線方向の比抵抗変化の影響を考慮しない水平多層構造を前提とした1次元解析では地下比抵抗構造を十分反映した解析が不可能であり、測線方向の比抵抗不連続境界の影響を含めて解析できる2次元解析が必要である。従来は、地下構造を任意の比抵抗ブロックに分割し、この比抵抗ブロックに推定される比抵抗値を当てはめた地下比抵抗モデルを作成し、この地下比抵抗モデルにより計算される理論値と実測値とを比較し、測定値にできるだけ近い応答を示すモデルを試行錯誤で組み立てていくフォワードモデリングが試みられていたが、この方法は解析者の恣意が含まれるなどの問題があった。今回解析に使用したインバージョン解析法は、各ブロックに当てはめる比抵抗値を非線形最小2乗法により推定させる自動反復解析法を適用することにより、解析者の恣意に依らない客観的な解析結果を得ることが可能である。モデルでは隣り合った測点の中間に比抵抗ブロック境界を設け、さらに各測点下のブロックを深度方向に浅部では薄く、深部では厚くなるように分割した四辺形比抵抗ブロックを作成した。これを地表の地形に合わせて変形させ、水平方向には地形と平行な形の比抵抗ブロックとした。これらの一つ一つの比抵抗ブロックに比抵抗値が与えられると、有限要素法によるモデル計算により地下の比抵抗構造に対応する地表での応答として各測点における見掛け比抵抗が得られる。これらの地表での応答と測定値の残差が最も小さくなるように比抵抗ブロックの値を最小二乗近似法による自動反復解析により求めた。反復解析を行う第一回目の比抵抗ブロックの値 (初期値) は全て同一比抵抗として与え、初期値が解析結果に与える影響を除去した。

## 2-5 調査結果

### 2-5-1 物性測定

#### (1) 測定方法

岩石の電気的特性データを収集する目的で、ボーリングコアから代表的な岩石を採取して室内測定を行った。試料数は30個である。測定では、時間領域IP法により、比抵抗及び分極率の測定を行った。

使用送信機は、Zonge社製室内試験装置 モデルLDT-10、受信機は現地調査と同一機を使用した。

岩石サンプルの測定手順及び比抵抗、分極率の計算式を以下に示す。

- ① 48時間以上蒸留水に浸して、含水飽和状態にする。
- ② 岩石サンプルの両端にCu-CuSO<sub>4</sub>電極を接触させ、電極に0.125Hzの微弱電流を流す。

③ サンプルの両端で電位差及び減衰曲線を測定する。

④ 以下に示す計算式より、比抵抗及び分極率を算出する

比抵抗：

$$\rho = \frac{A}{L} \times \frac{V_p}{I}$$

$\rho$	：比抵抗(ohm·m)
$A$	：岩石サンプルの断面積(m <sup>2</sup> )
$L$	：岩石サンプルの長さ(m)
$V_p$	：受信電位(V)
$I$	：送信電流(A)

分極率：

$$M = \frac{1.87}{V_p} \times \int_{t_1}^{t_2} V_s dT$$

$M$	：分極率(mV/V)
$V_p$	：一次電位(V)
$V_s$	：二次電位(mV)
$dT$	：サンプリング間隔(秒)
$t_1$	：電流切断後 500msec
$t_2$	：電流切断後 1,100msec

二次電位のデータ取得範囲は500.0～1,100.0msecであるが、上記の式で分極率を計算した後、係数を掛けて450.0～1,100.0msecの範囲で得られる値(Newmont Standard)に変換している。

## (2) 測定結果

岩石試料の室内測定結果を Table II-2-3 に示す。

比抵抗は、22 ～34,600Ω·m の範囲で変化する。枕状溶岩及び塊状溶岩はほぼ 100～500Ω·m の範囲の値を示すが、試料番号 10 の枕状溶岩は低比抵抗 (42Ω·m) を示し、試料番号 13, 20 の枕状溶岩は高比抵抗 (それぞれ 1535Ω·m, 822Ω·m) を示す。V1-1 と V1-2 での顕著な違いは認められない。岩脈は試料番号 3, 4, 7 のドレライトが 200～600Ω·m 程度の値を示し、試料番号 16 の玄武岩は 1000Ω·m に近い高比抵抗を示す。貫入岩類では試料番号 21～23 のカンラン岩が数千～数万Ω·m の高比抵抗を示すのに対し、試料 24 のガプロは 22Ω·m と低比抵抗を示す。

分極率は 0.1～44mV/V の範囲で変化する。黄鉄鉱の鉱染が認められる試料は一般的に高分極率を示す。特に強い鉱染の認められる試料番号 28 の枕状溶岩は 44mV/V の高分極率を示す。試料番号 8～10, 12 は黄鉄鉱の鉱染が認められるものの 4mV/V 以下の低分極率を示す。高比抵抗

Table II-2-3 Resistivity and chargeability of rock samples

Sample No.	Borehole and Depth	Resistivity ( $\Omega.m$ )	Chargeability (mV/V)	Rock Name and Formation	Alteration and Mineralization
1	Z1-22.3m	508	3	Ma(V1-2)	
2	Z1-31.3m	245	18	Ma(V1-1)	Sili, Epi vein, Py vein & diss(sl)
3	Z1-50.0m	180	14	Do(dyke)	Py vein & diss(sl)
4	Z1-70.1m	373	10	Do(dyke)	
5	Z1-85.0m	147	13	Ma(V1-1)	Py diss(sl)
6	Z1-113.4m	314	15	Pw(V1-1)	Sili, Epi diss, Py diss(sl)
7	Z1-141.1m	589	7	Do(dyke)	
8	Z1-166.5m	149	3	Pw(V1-1)	Sili, Qz vein, Py vein & diss(sl)
9	Z1-171.6m	194	3	Ma(V1-2)	Sili, Qz vein, Py vein & diss(sl)
10	Z1-209.5m	42	2	Pw(V1-1)	Sili, Qz vein, Py vein & diss
11	Z1-222.9m	116	14	Pw(V1-1)	Sili, Py vein & diss
12	Z1-238.8m	187	4	Pw(V1-1)	Sili, Qz vein, Py vein & diss
13	M1-30.9m	1,535	26	Pw(V1-2)	Sili
14	M1-61.6m	484	9	Ma(V1-2)	Sili, Py diss(sl)
15	M1-91.0m	356	8	Pw(V1-2)	Sili, Ca, Py diss(sl)
16	M1-135.3m	936	9	Ba(dyke)	
17	M1-155.7m	166	26	Pw(V1-2)	Sili, Py vein & diss
18	M1-192.8m	218	14	Pw(V1-2)	Sili, Py vein & diss(sl)
19	M1-225.8m	561	13	Pw(V1-2)	Sili, Qz vein, Py vein & diss(sl)
20	M1-268.0m	822	29	Pw(V1-2)	Sili
21	M2-31.4m	3,299	1	Pe	
22	M2-59.4m	34,600	2	Pe	
23	M2-115.8m	28,860	2	Pe	
24	M2-138.3m	22	3	Gb	
25	M2-144.4m	122	3	Ma(V1-1)	
26	M2-165.7m	1,733	0.1	Pw(V1-1)	Sili, Epi diss
27	M2-190.3m	496	4	Pw(V1-1)	Sili, Epi vein & diss, Py-diss
28	M3-132.2m	289	44	Pw(V1-1)	Sili, Qz vein, Py vein & diss(in)
29	M3-143.3m	417	6	Pw(V1-1)	Sili, Epi vein
30	M3-147.1m	431	6	Pw(V1-1)	Sili, Epi vein & diss

## Remarks

Z: Zuha  
 M: Maqail  
 V1-1: Lower Extrusives 1  
 V1-2: Lower Extrusives 2  
 Ba: Basalt  
 Pw: Pillow lava  
 Ma: Massive lava  
 Do: Dolerite  
 Pe: Peridotite  
 Gb: Gabbro  
 Py: Pyrite  
 Ca: Calcite  
 Epi: Epidots  
 Qz: Quartz  
 Sili: Silicified  
 diss dissemination  
 vein veinlets  
 (sl): Slight  
 (in): Intense

を示した試料番号 13, 20 の枕状溶岩は黄鉄鉱の鉱染は認められないが約 30mV/V の高分極率を示す。貫入岩類はいずれも 3mV/V 以下の低分極率を示す。

## 2-5-2 グザイン地区

### (1) 測線設定

本地区では平成 7 年度にグザイン東部地区及び西部地区として、計 14 測線の調査が実施されている。

本年度は、グザイン東部においては、測線 400E~1400E の計 6 本をそれぞれ北側に 400m 延長し、さらに東側に測線長 2km の測線 5 本 (測線 1600E~2400E)、計 12.4km を設定した。また、グザイン西部においては、西側に測線長 2.1km~2.4km の測線 8 本 (測線 600W~2000W)、計 17.8km を設定した。測線の方向は平成 7 年度と同様にグザイン東部は N40° E、グザイン西部は N20° E である。

測線位置を Fig. II-2-4 に示す。

### (2) 測定結果

見掛比抵抗、分極率及びメタルファクターの断面図をそれぞれ Fig. II-2-5(1)~Fig. II-2-5(2)及び Fig. II-2-12, Fig. II-2-6(1)~Fig. II-2-6(2)及び Fig. II-2-13, Fig. II-2-7(1)~Fig. II-2-7(2)及び Fig. II-2-14 に、また平面図を Fig. II-2-8~Fig. II-2-11 及び Fig. II-2-15~Fig. II-2-18 に示す。文中では見掛比抵抗を便宜上、比抵抗と呼称する。

本年度調査を実施したグザイン地区東部の測線 1600E~2400E において、見掛比抵抗分布から東西系の構造が見られる。南側は中~高比抵抗、北側は低比抵抗を示しており、それぞれ下部噴出岩類、上部噴出岩類の分布域とほぼ一致している。この傾向は n=1~4 まで見られる (Fig. II-2-8~Fig. II-2-11)。分極率についても見掛比抵抗とほぼ同じ分布様式を呈しており、中~高比抵抗が分布する南側で高く、低比抵抗が分布する北側で低い値を示す。また、その境界は明瞭である。メタルファクターは、全体的に低い値であり、明瞭な異常帯は捕捉できなかった。一部、測線 2000E~2400E 測点 35 付近の低比抵抗帯において 25 以上の高い値を示しているが、分極率が 2~5mV/V と低く、鉱化作用に関係しない異常である。

グザイン地区西部の測線 600W~2000W の見掛比抵抗は全体的に南側が高く、北側では低い値を示している。また、測線 600W~1400W 測点 15 付近の浅部において、25Ω・m 以下の低比抵抗帯が見られ、南側に伸びる傾向が認められる (Fig. II-2-15)。分極率は、全体的に数 mV/V と低い値を示しており、異常帯は認められない。メタルファクターは、前述した低比抵抗帯において、最大 24 の値を示している。しかしながら、分極率は 2~8mV/V と低い値であり、鉱化作用に関係しない異常である。

### (3) 2次元解析結果

2次元解析は、全測線に対して行った。その内異常が得られた代表的な断面図について記載す



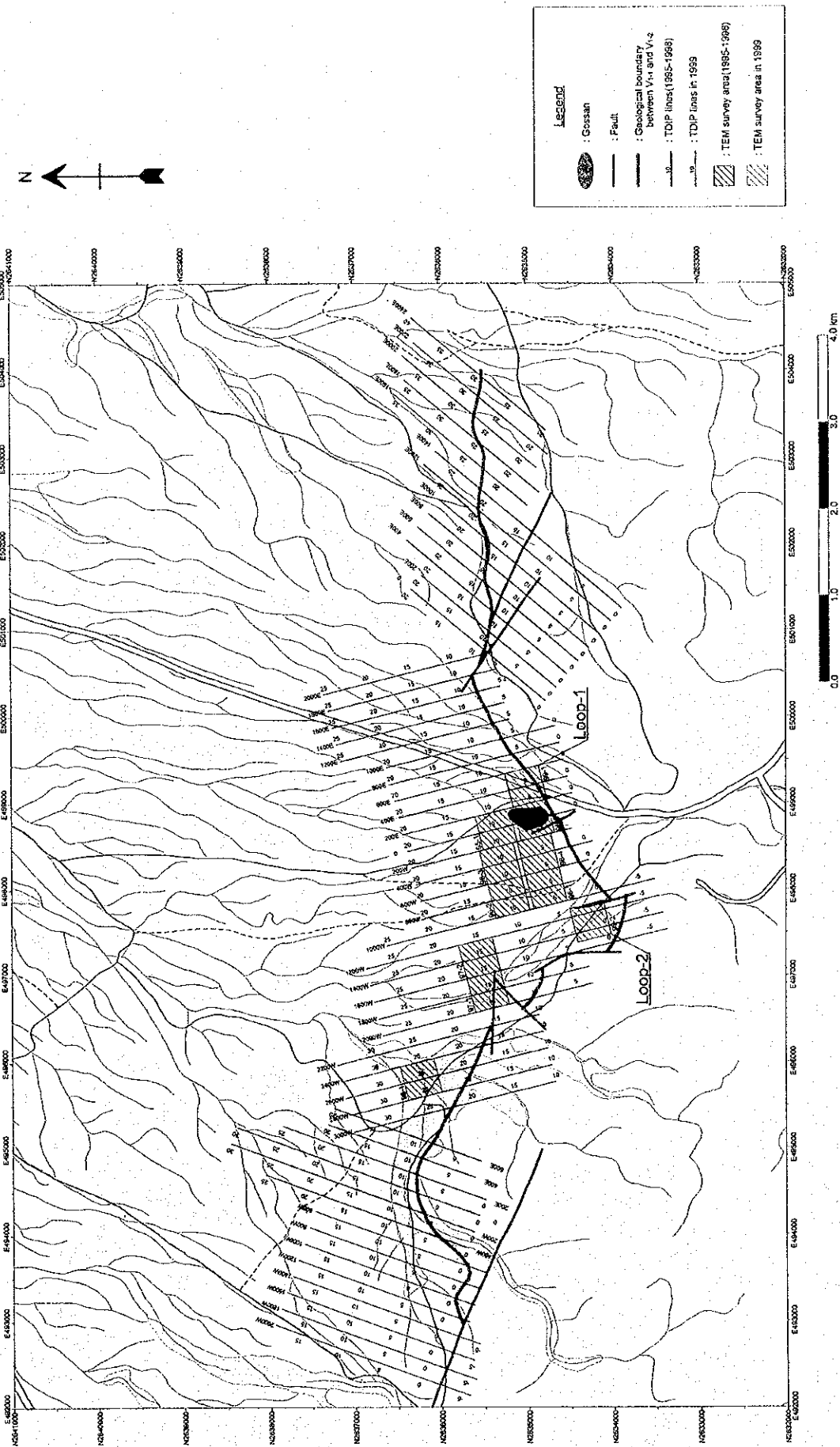


Fig. II -2-4 Geophysical survey location in Ghuzayn area



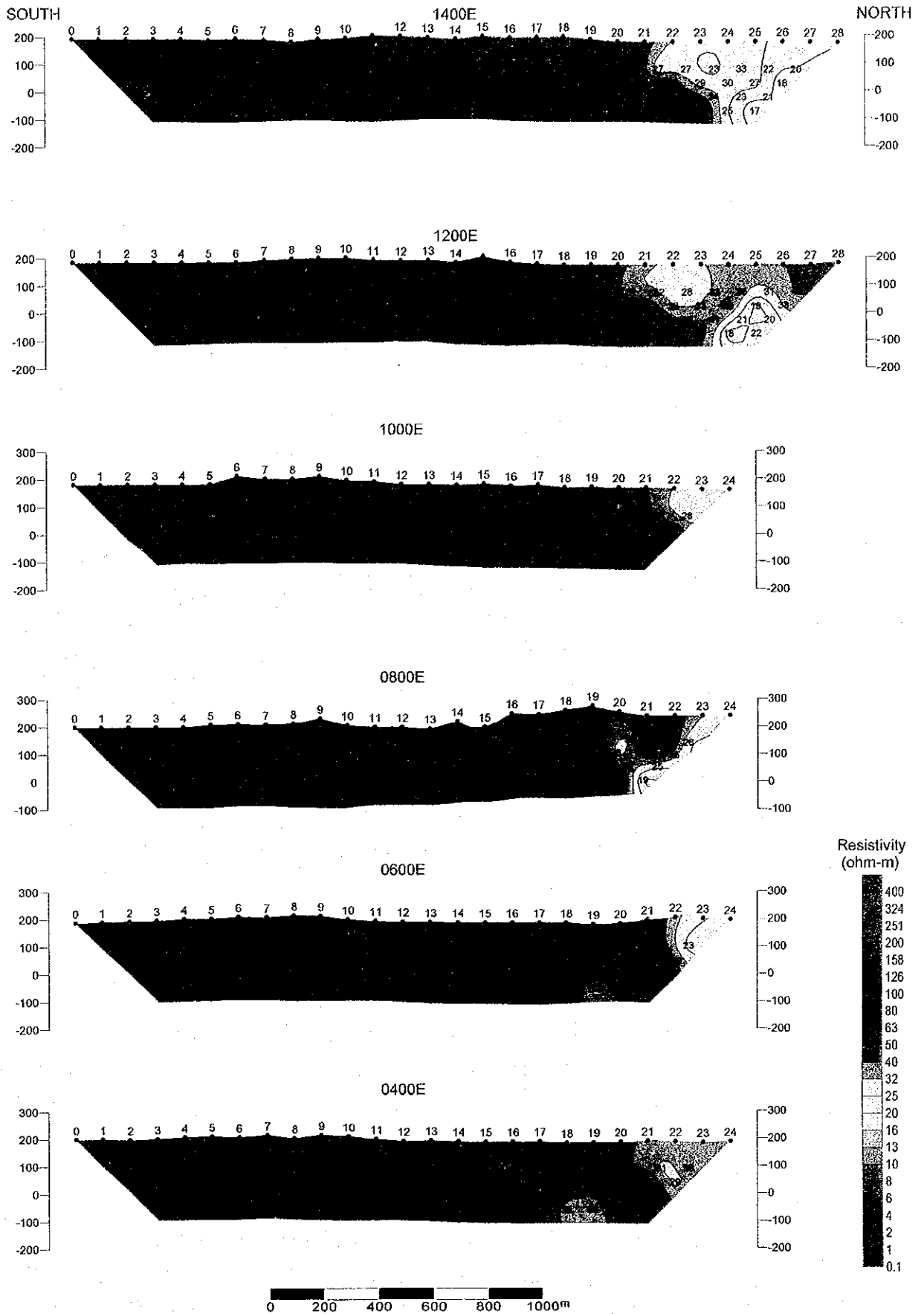


Fig. II-2-5(1) Apparent resistivity pseudo-sections in Ghuzayn area(East)

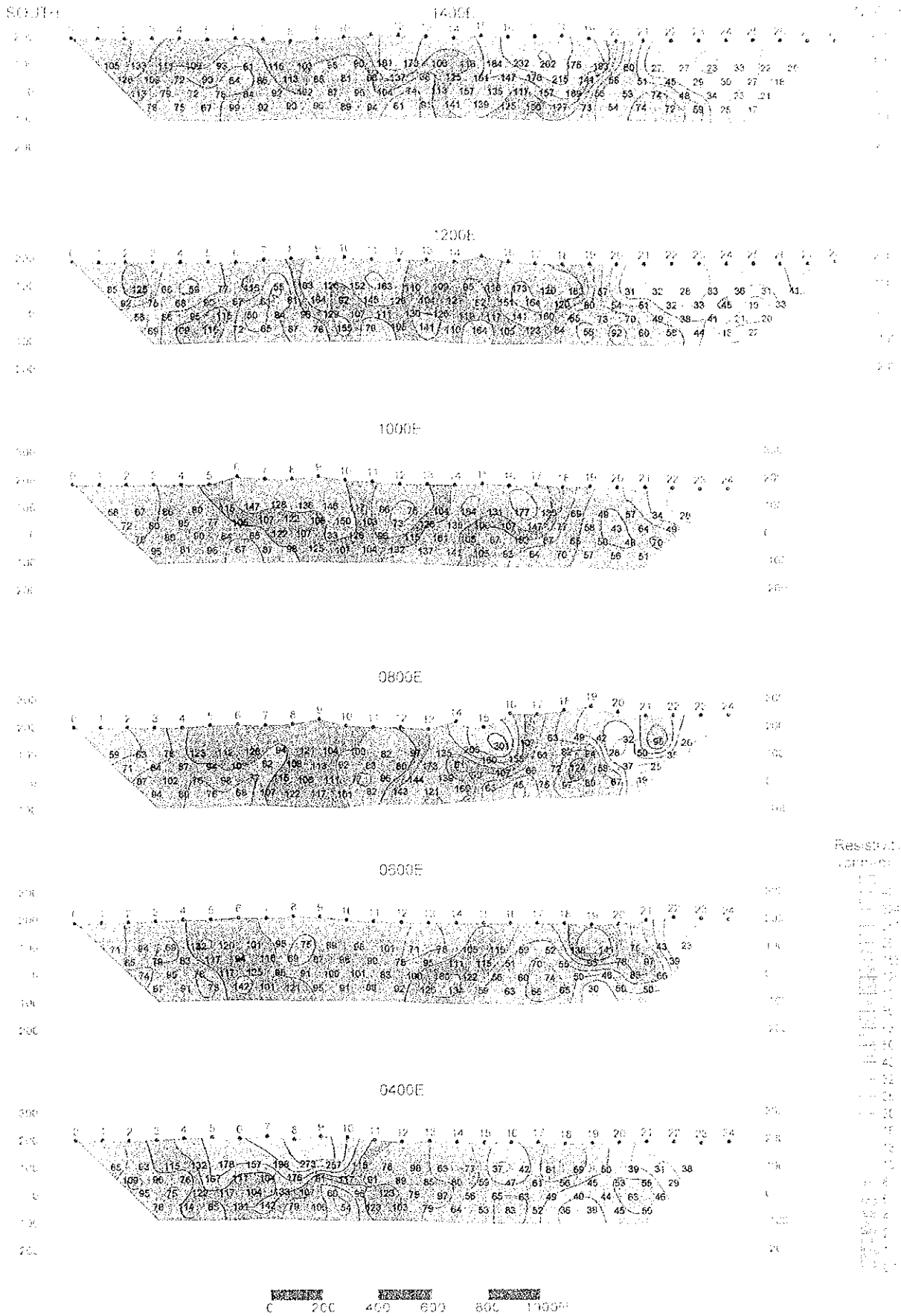


Fig. II-2-5(1) Apparent resistivity pseudo-sections in Ghuzayn area (East)



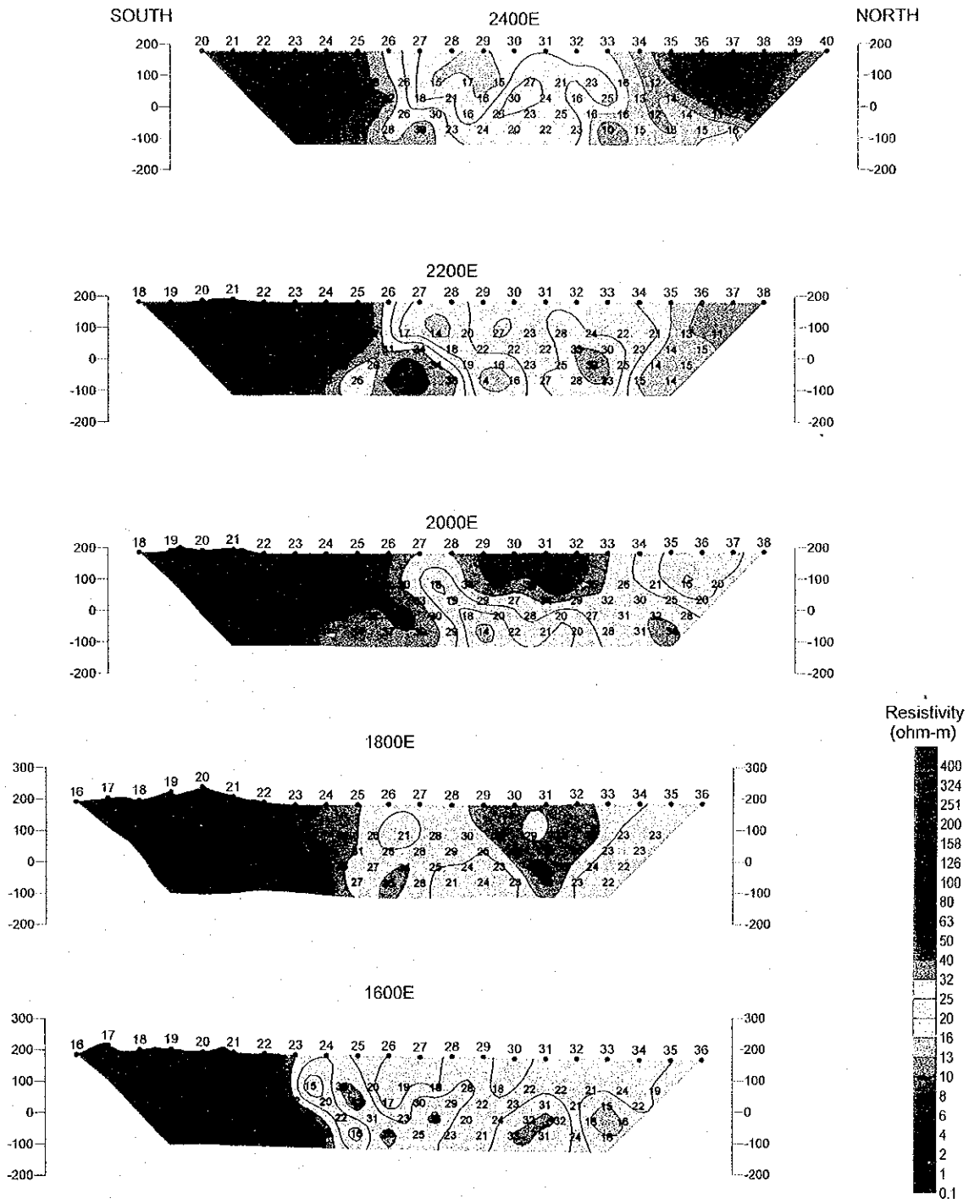


Fig. II -2-5(2) Apparent resistivity pseudo-sections in Ghuzayn area(East)

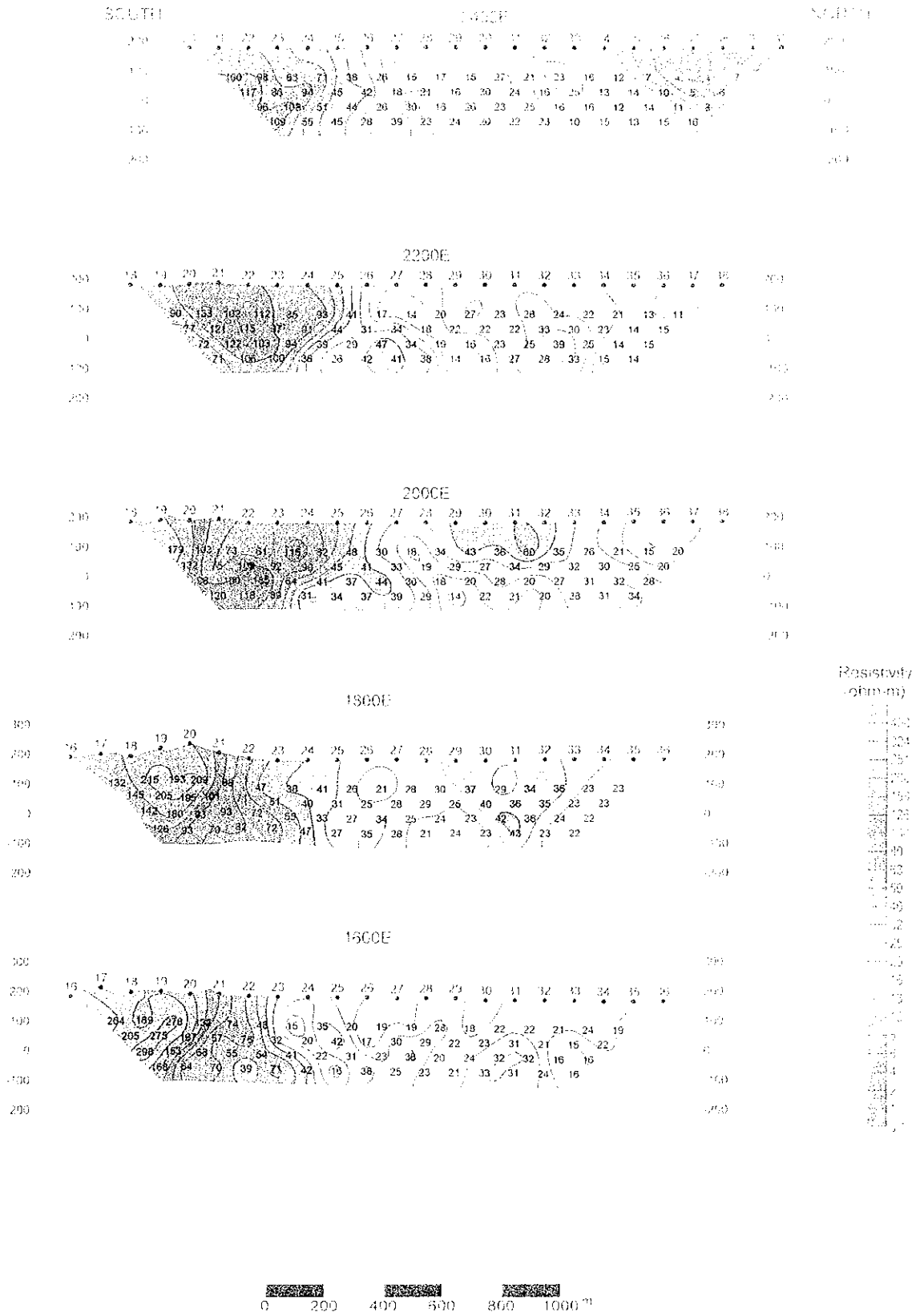


Fig. II -2-5(2) Apparent resistivity pseudo-sections in Ghuzayn area(East)





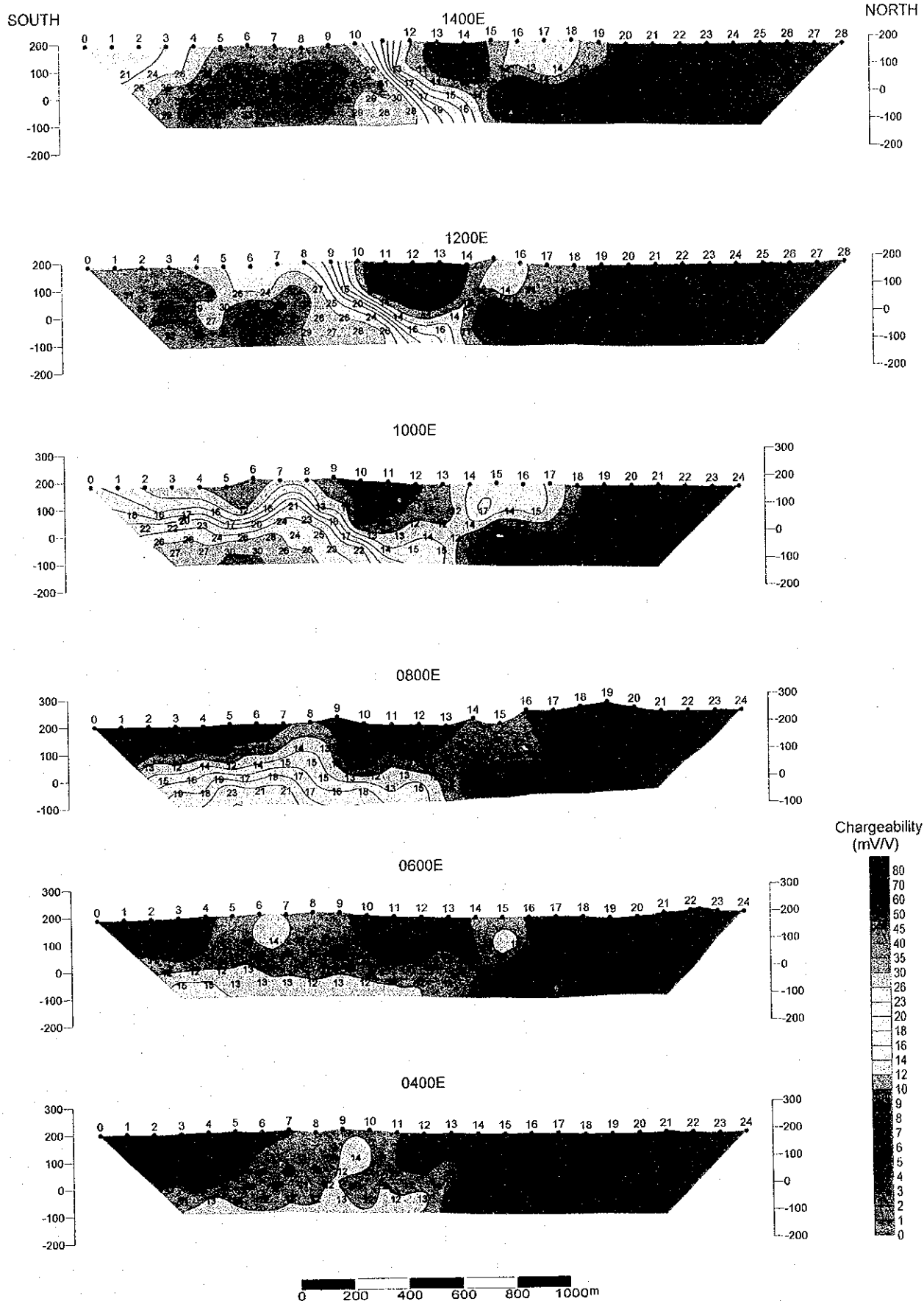


Fig. II -2-6(1) Chargeability pseudo-sections in Ghuzayn area(East)

SOUTH

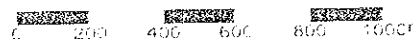
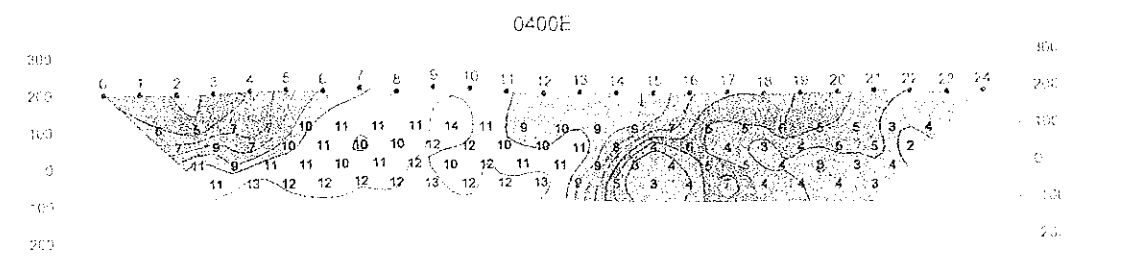
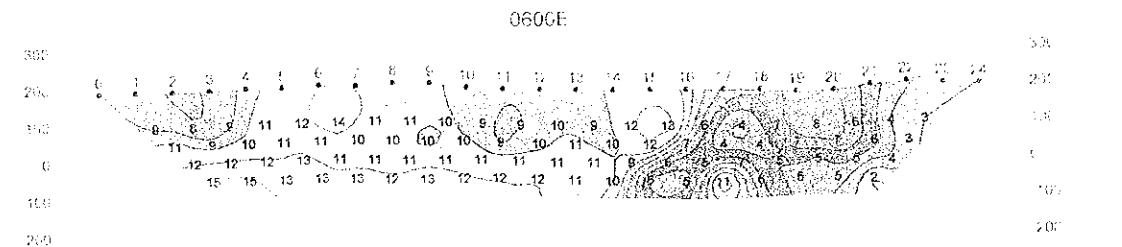
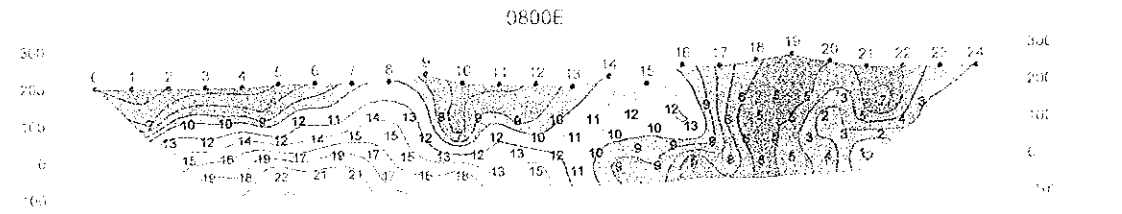
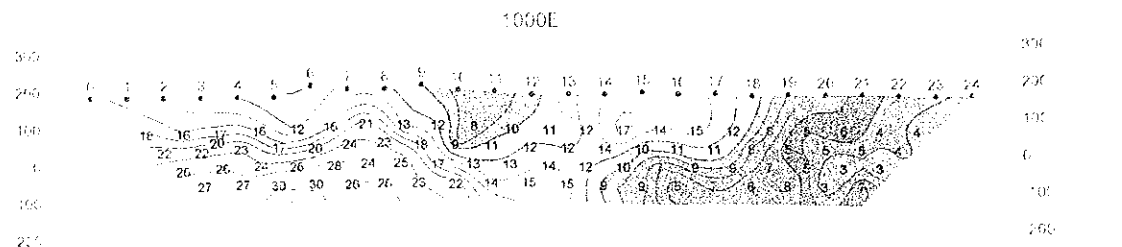
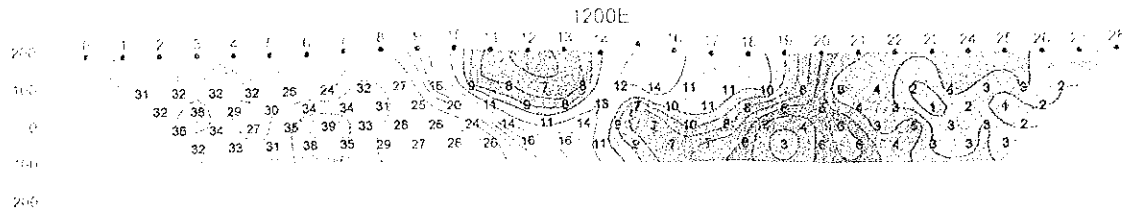
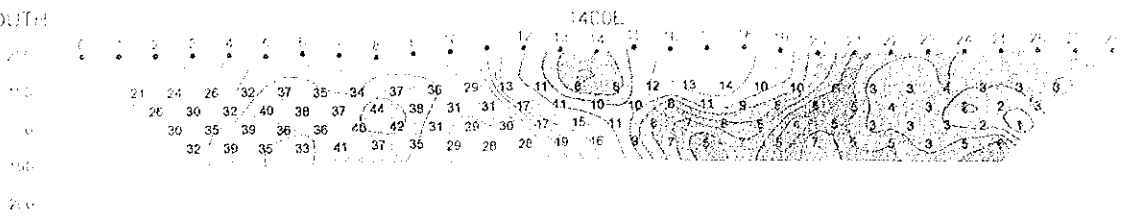


Fig. II-2-6(1) Chargeability pseudo-sections in Gruzayn area(East)



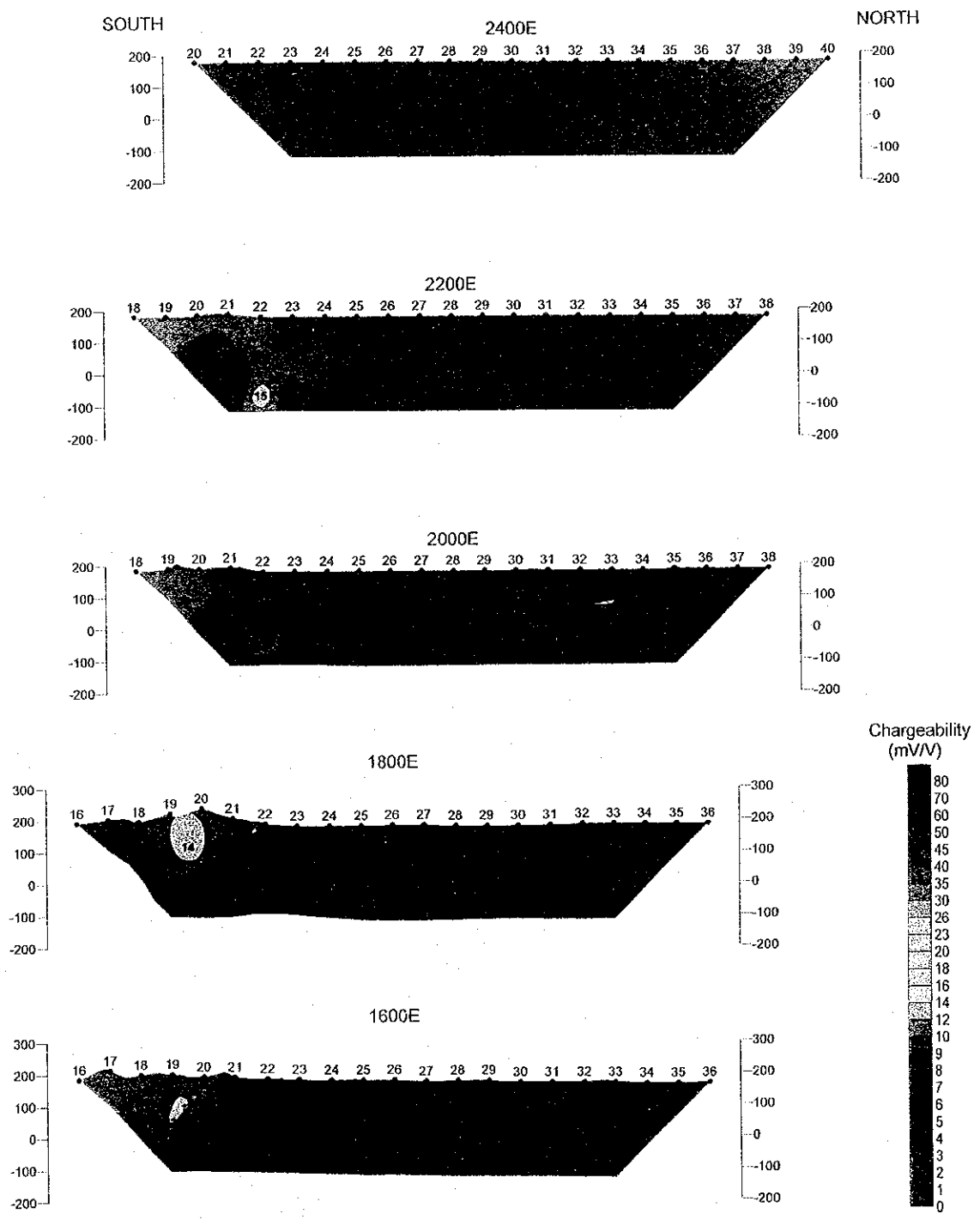


Fig. II -2-6(2) Chargeability pseudo-sections in Ghuzayn area(East)

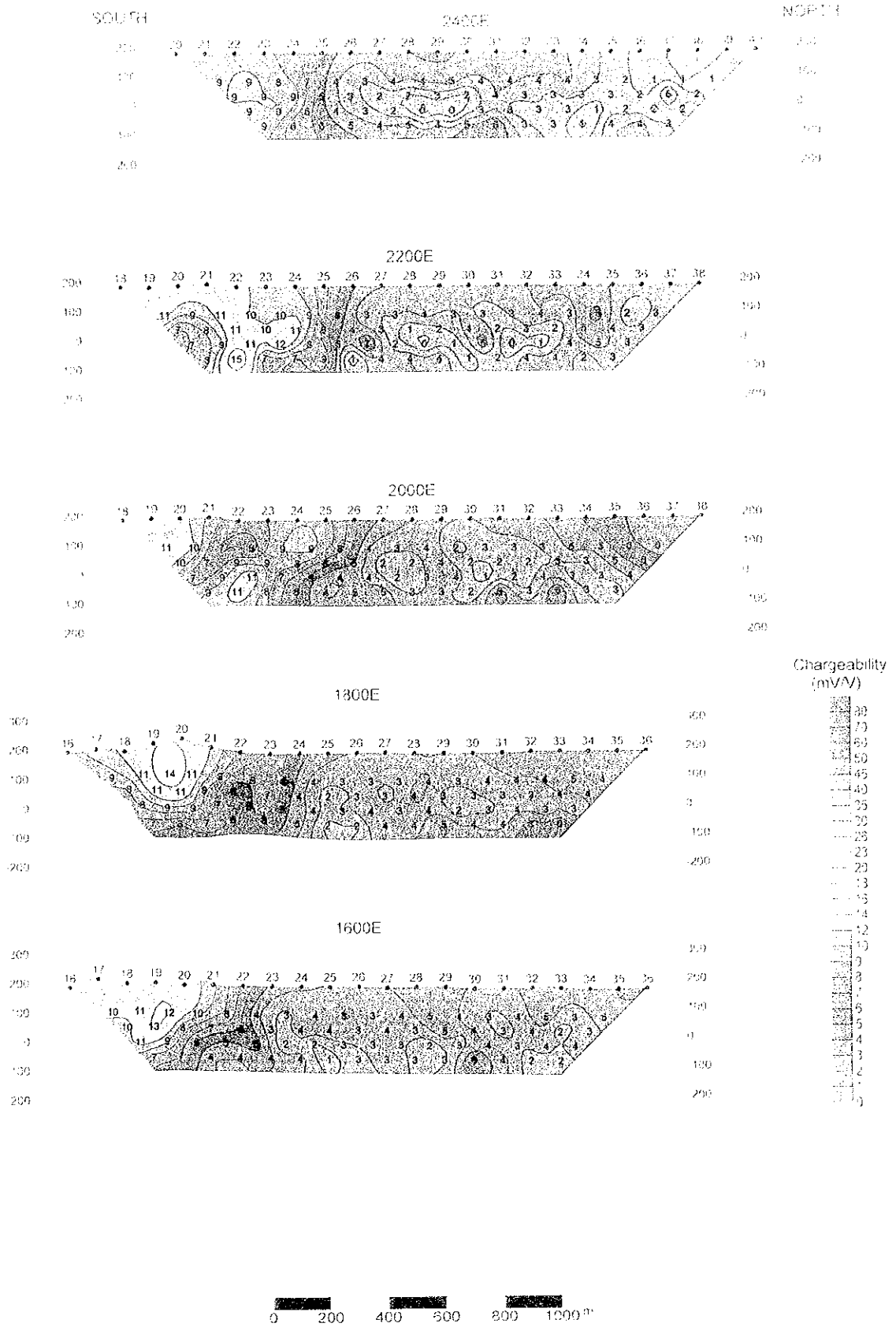


Fig. II-2-6(2) Chargeability pseudo-sections in Ghuzayn area(East)



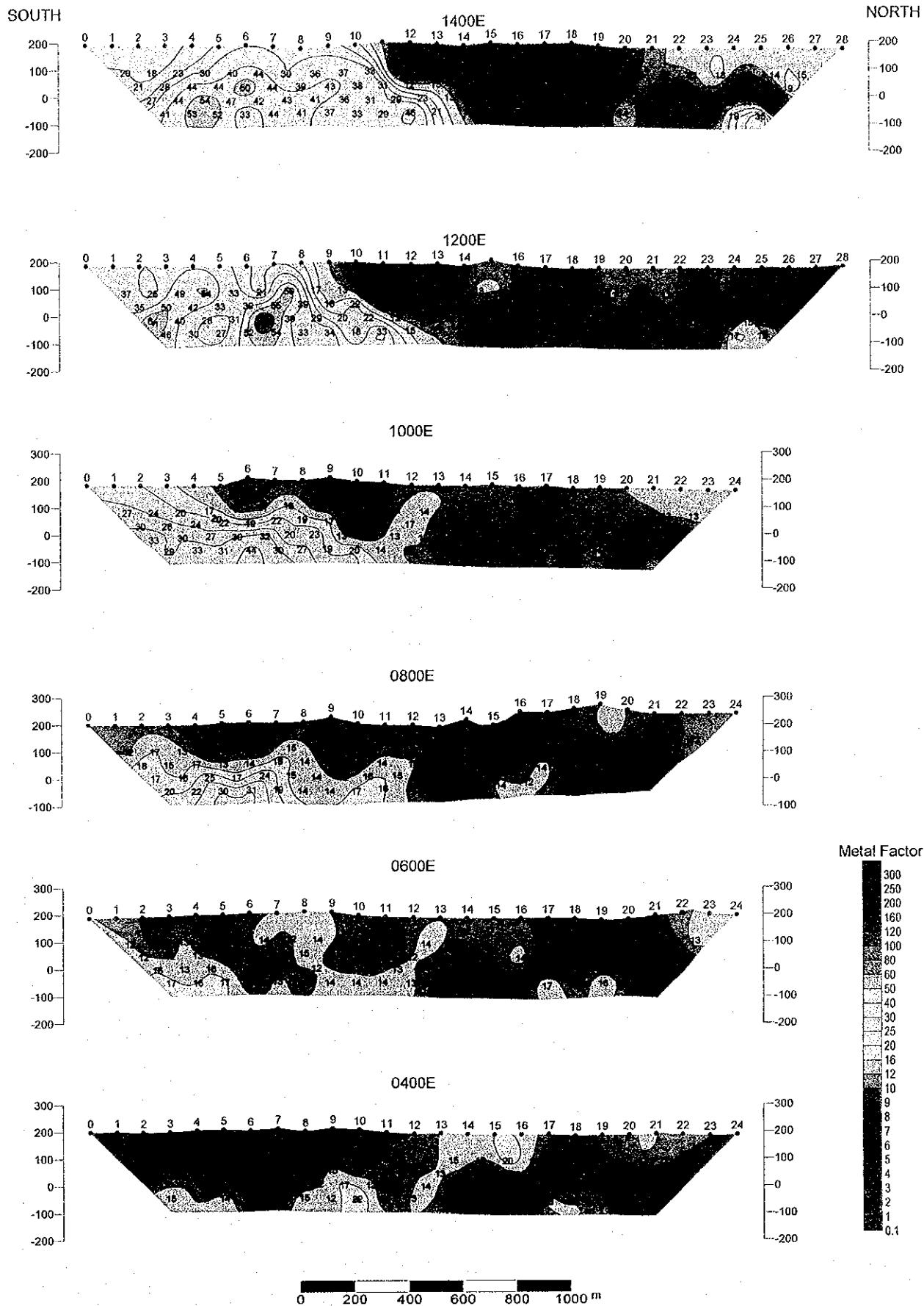


Fig. II-2-7(1) Metal factor pseudo-sections in Ghuzayn area(East)

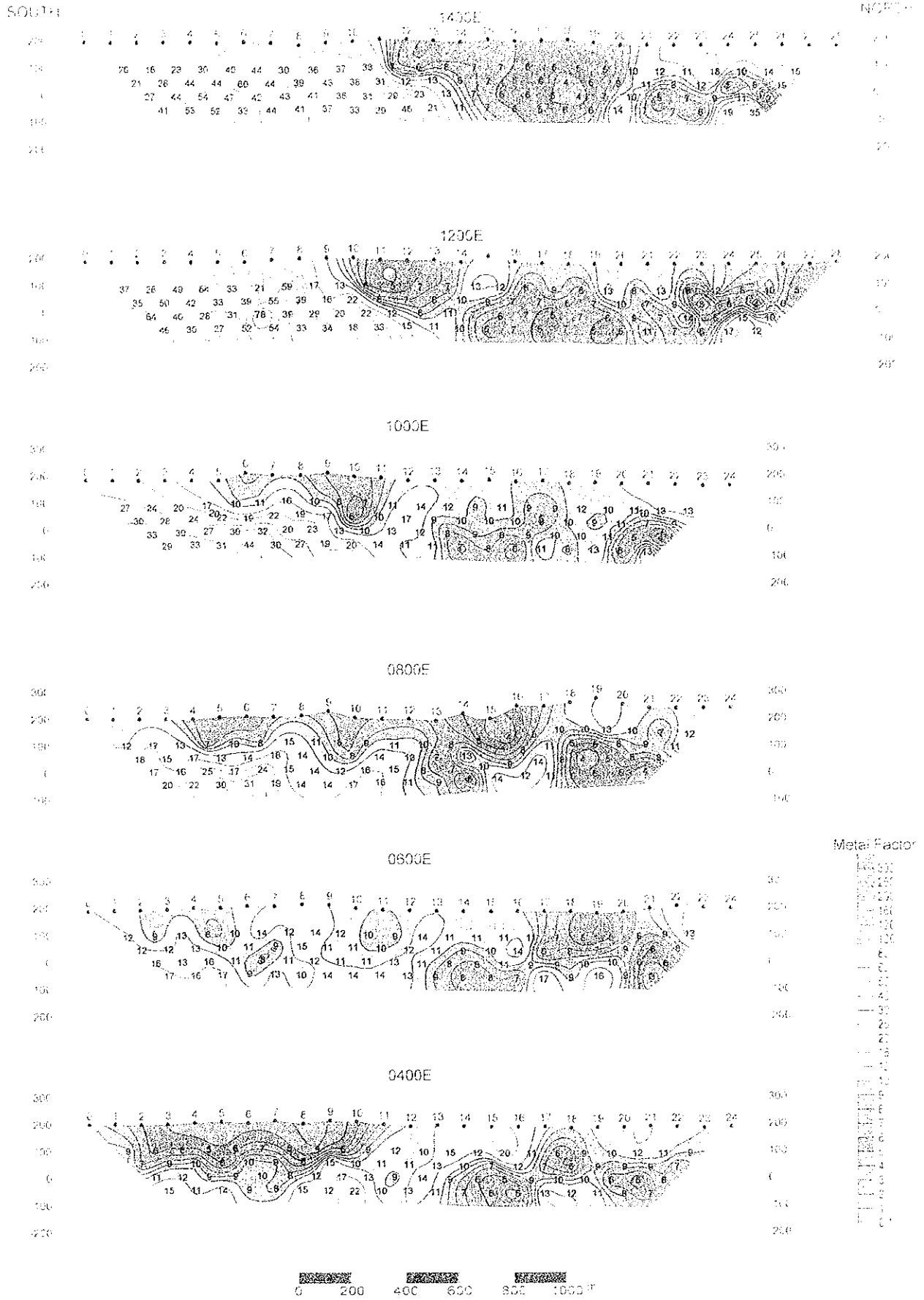


Fig. II-2-7(D) Metal factor pseudo-sections in Ghuzayn area (East)





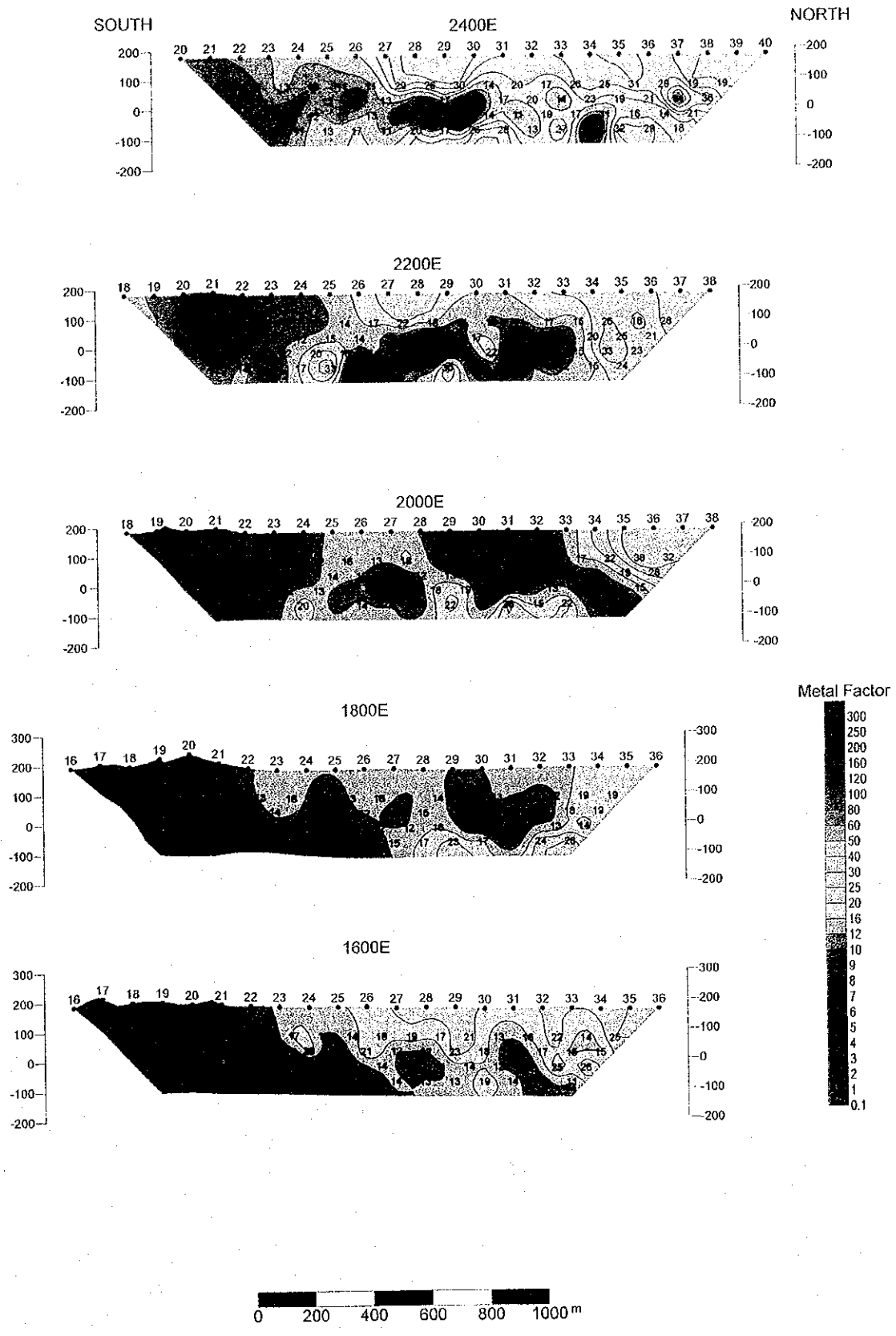


Fig. II -2-7(2) Metal factor pseudo-sections in Ghuzayn area(East)

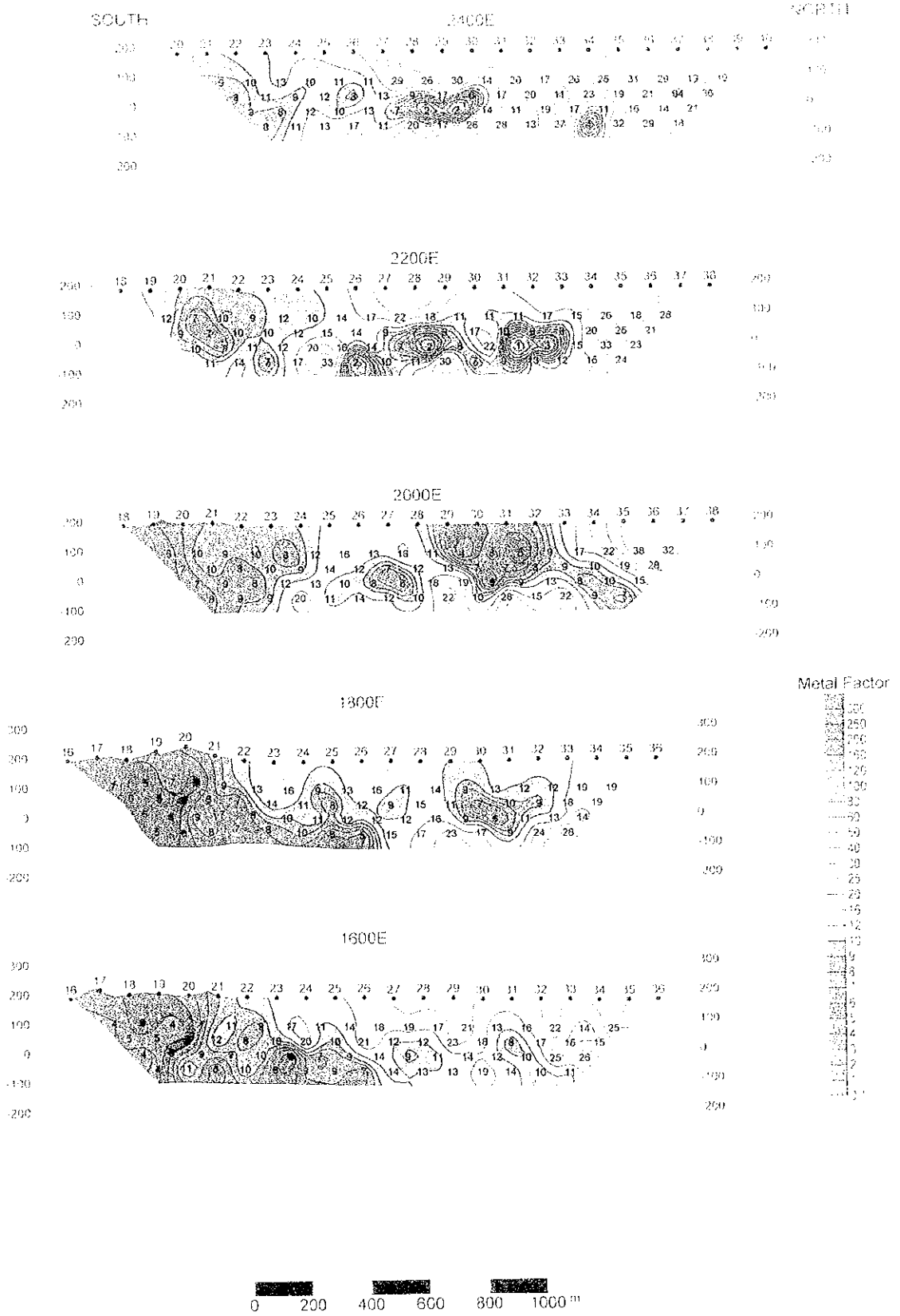


Fig. II -2-7(2) Metal factor pseudo-sections in Ghuzayn area (East)



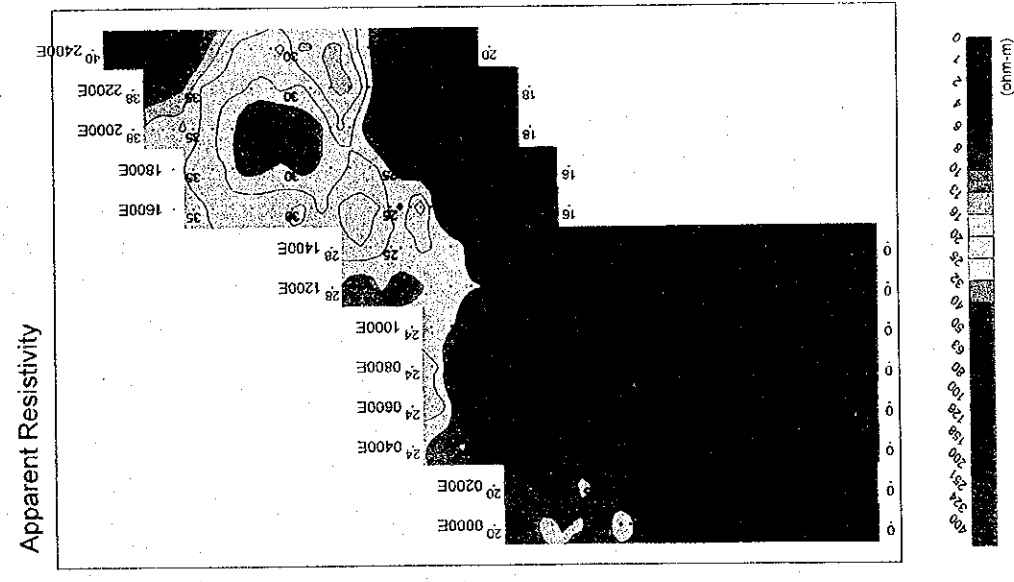
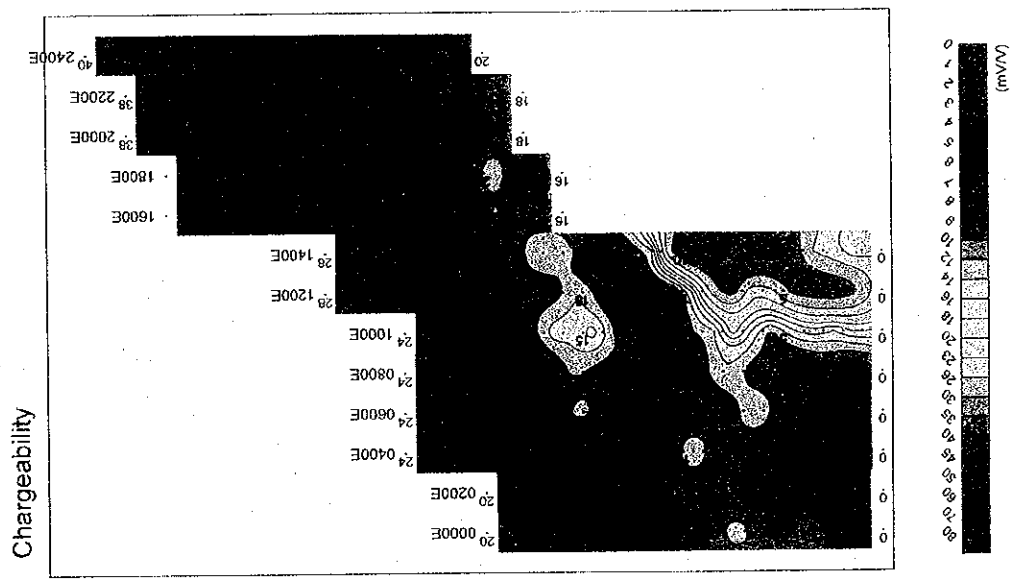
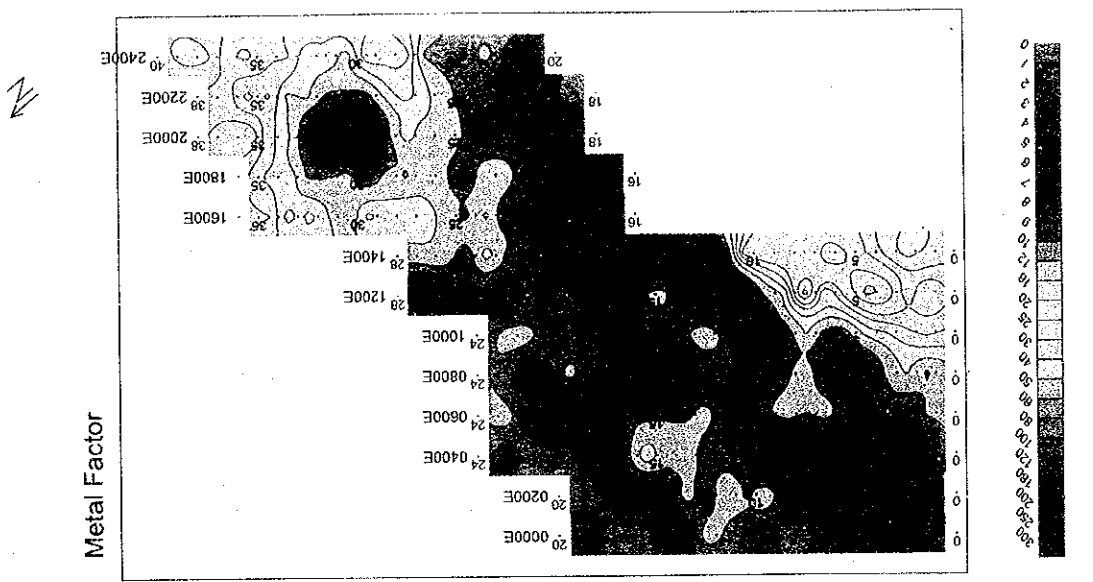


Fig. II -2-8 IP plane map of n=1 in Ghuzayn area(East)

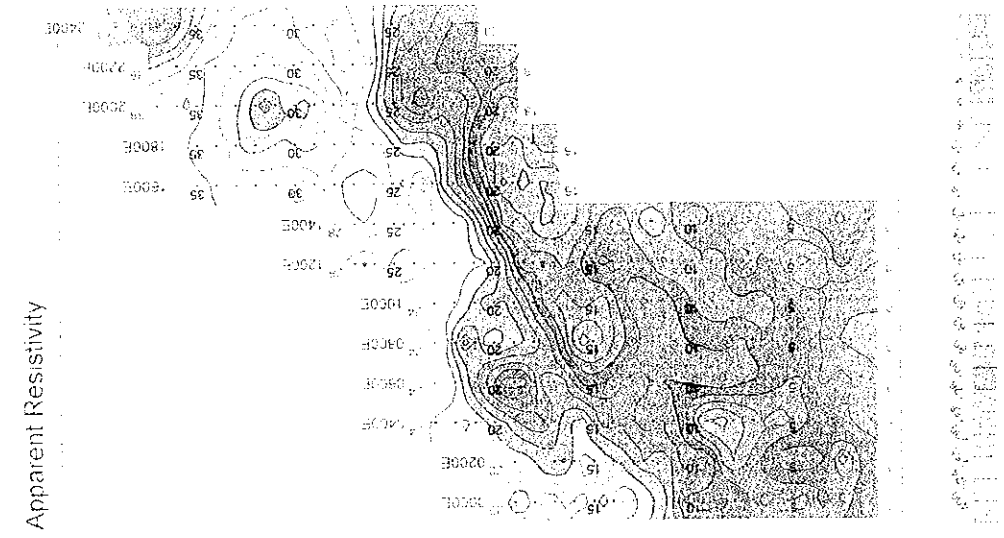
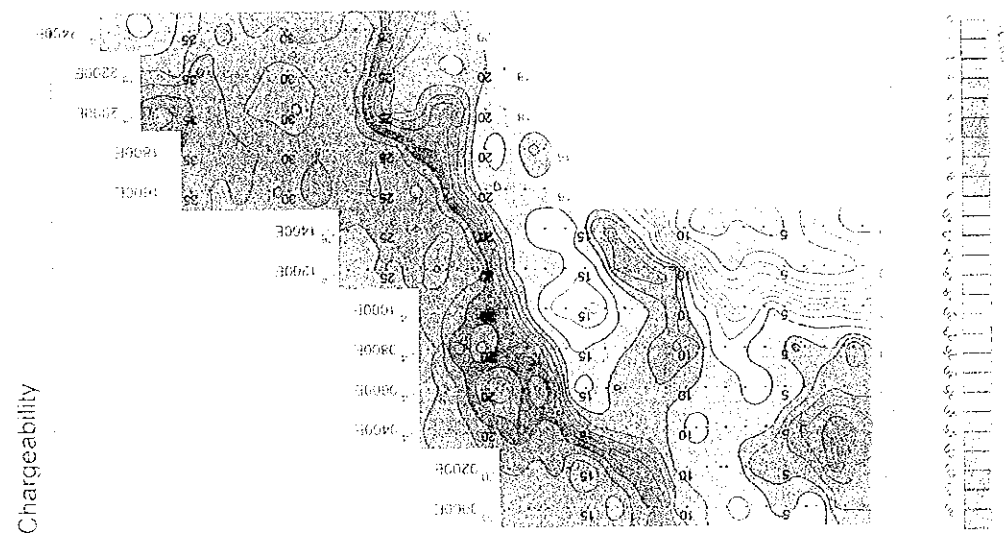
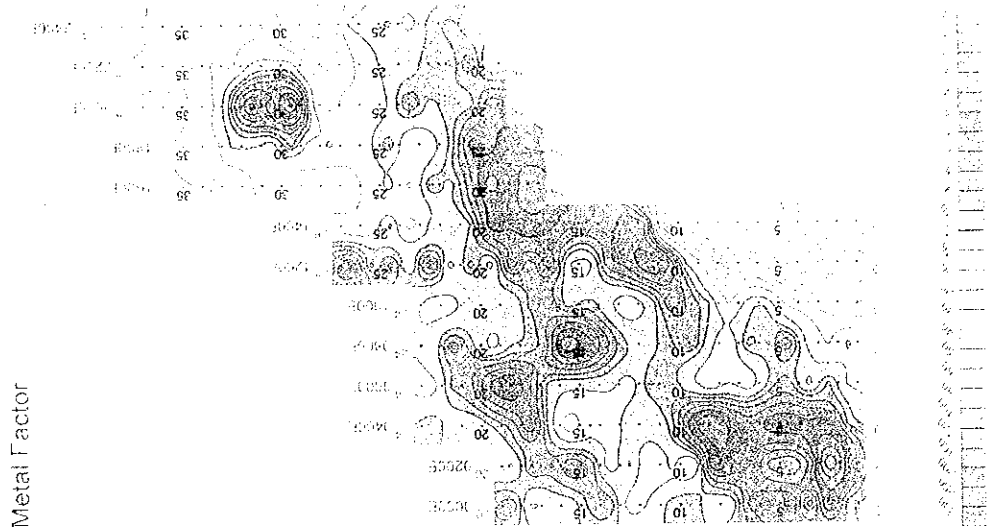


Fig. H.2.8 IP plane map of  $\alpha = 1$  in Ghuzayn area (Faso)



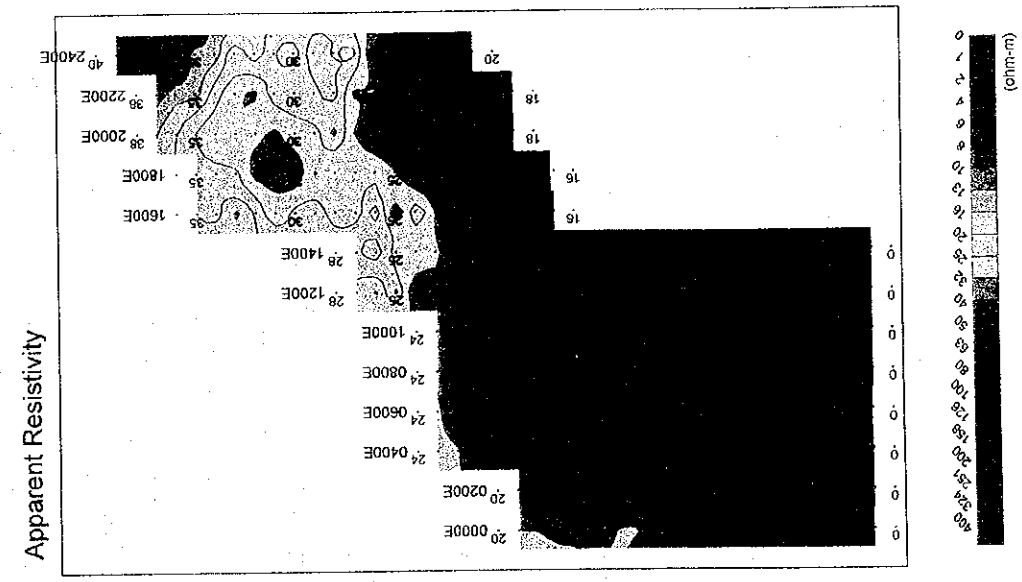
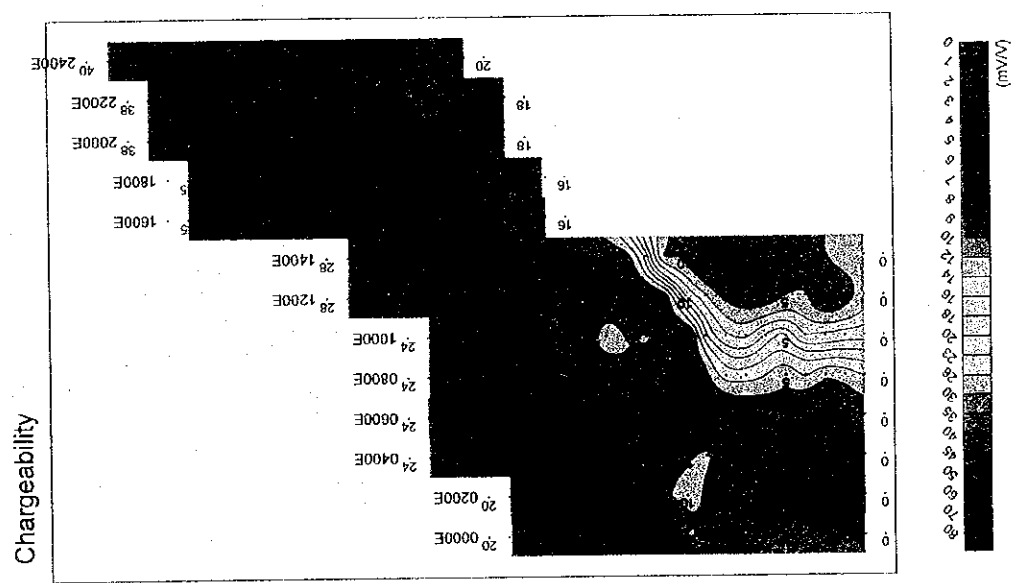
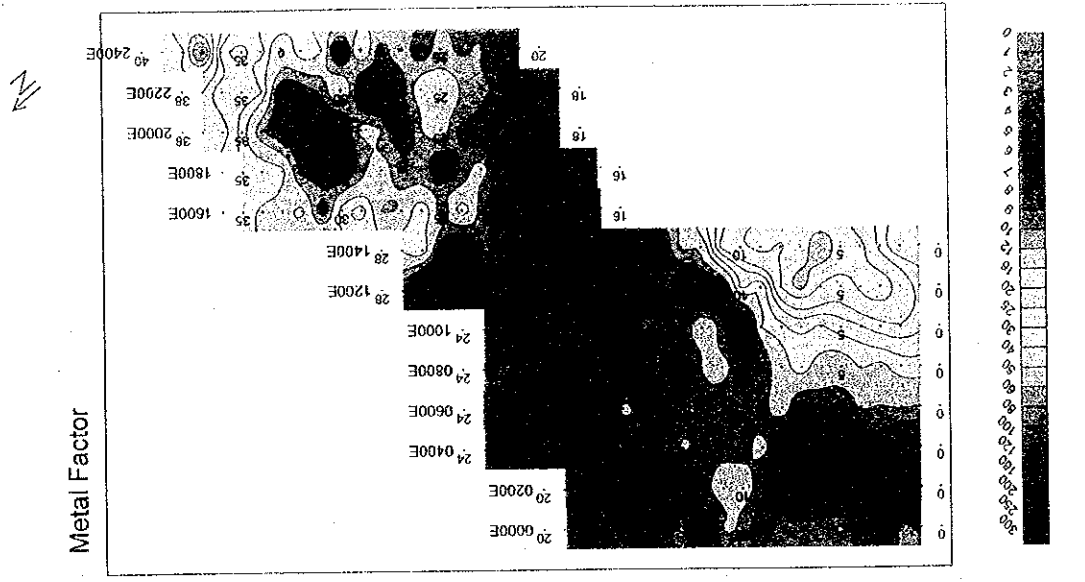
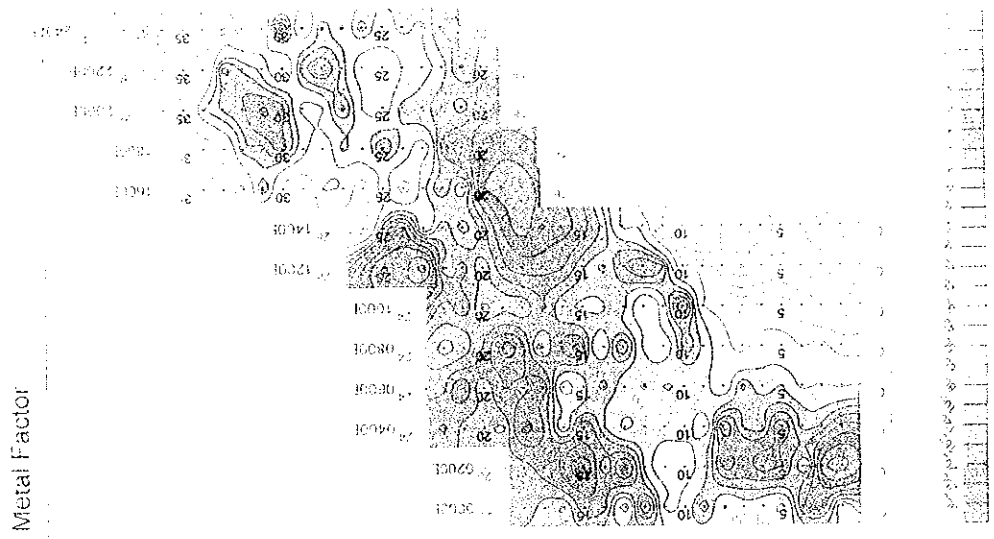
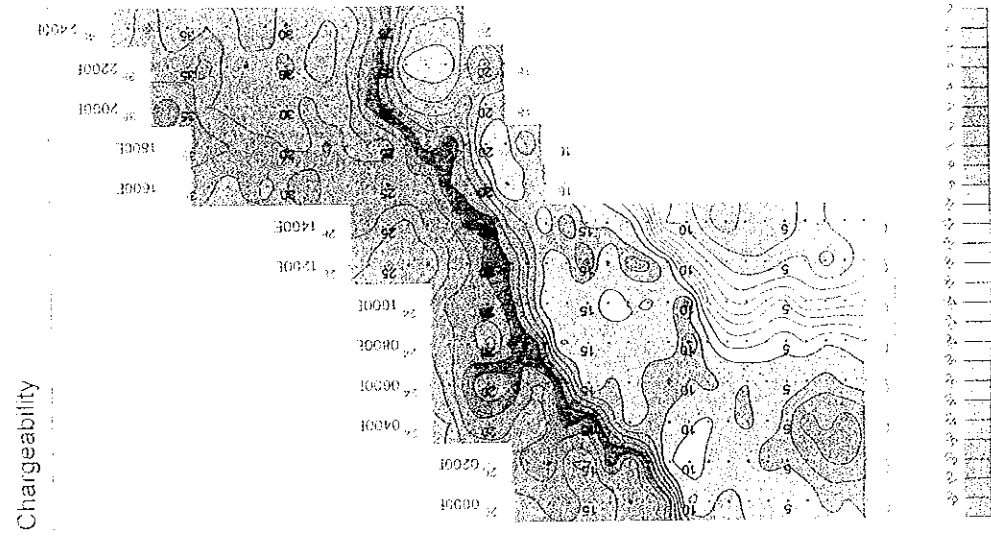


Fig II -2-9 IP plane map of n=2 in Ghuzayn area(East)

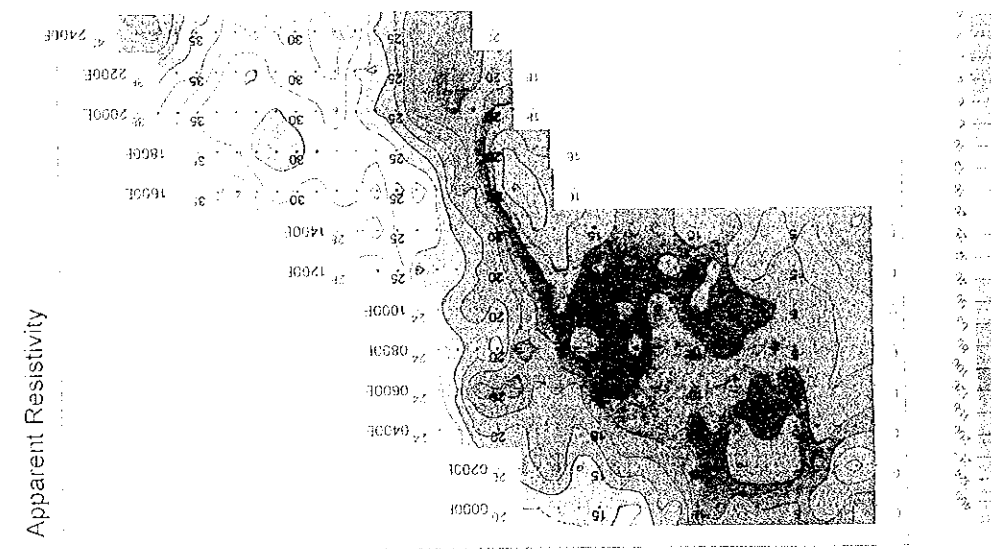




Metal Factor

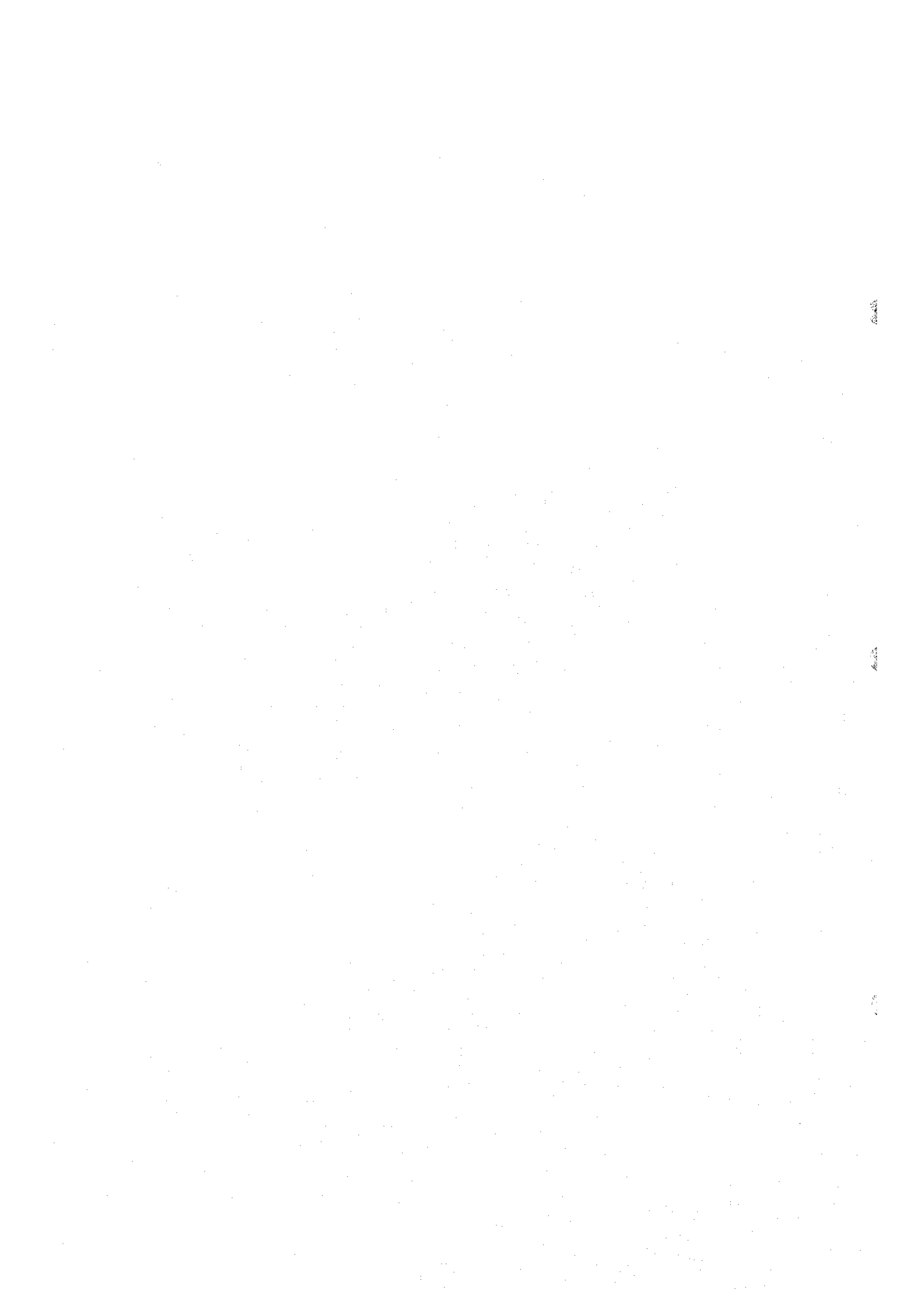


Chargeability



Apparent Resistivity

Fig. H. 2-9 IP plane map of n-2 in Ghuzayn area (East)



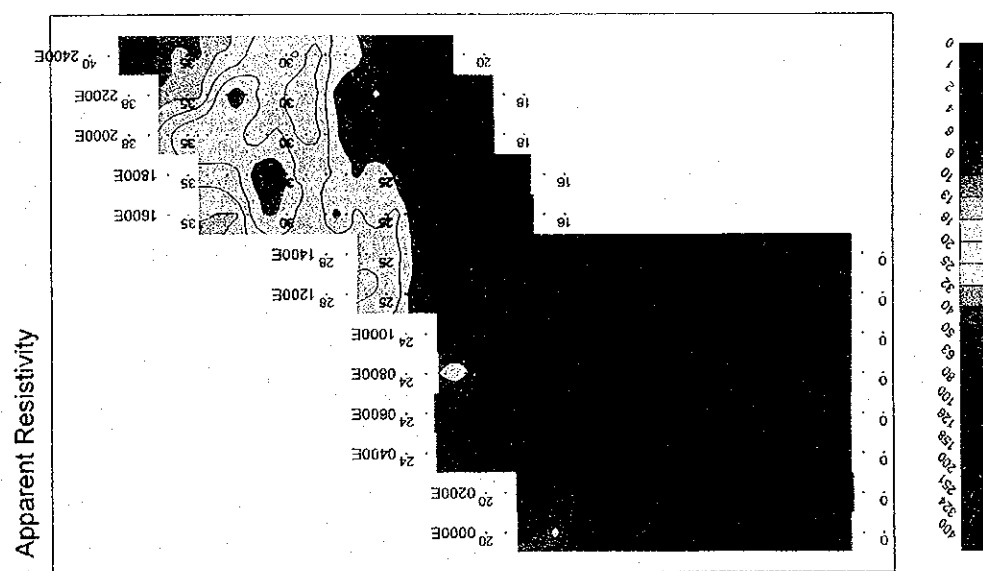
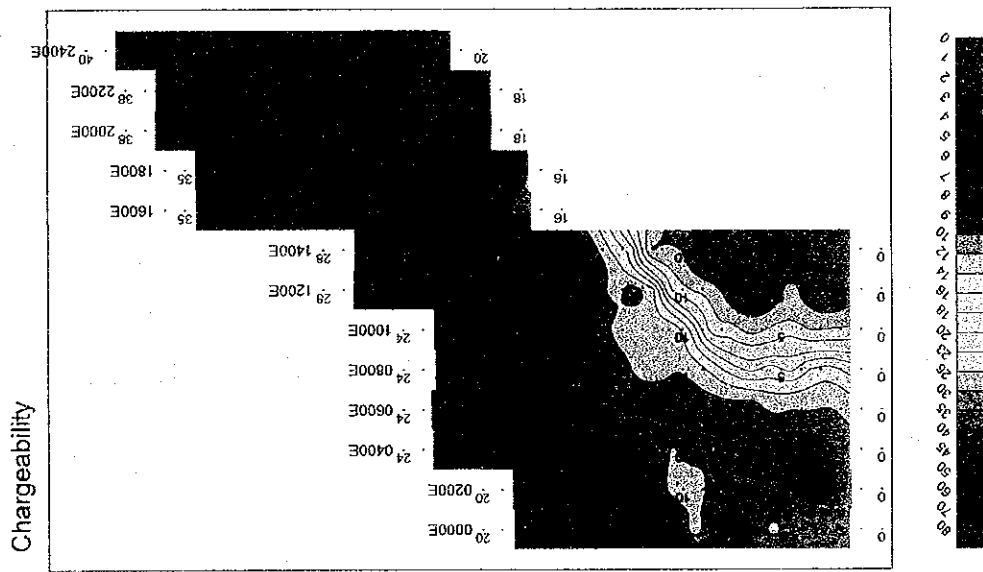
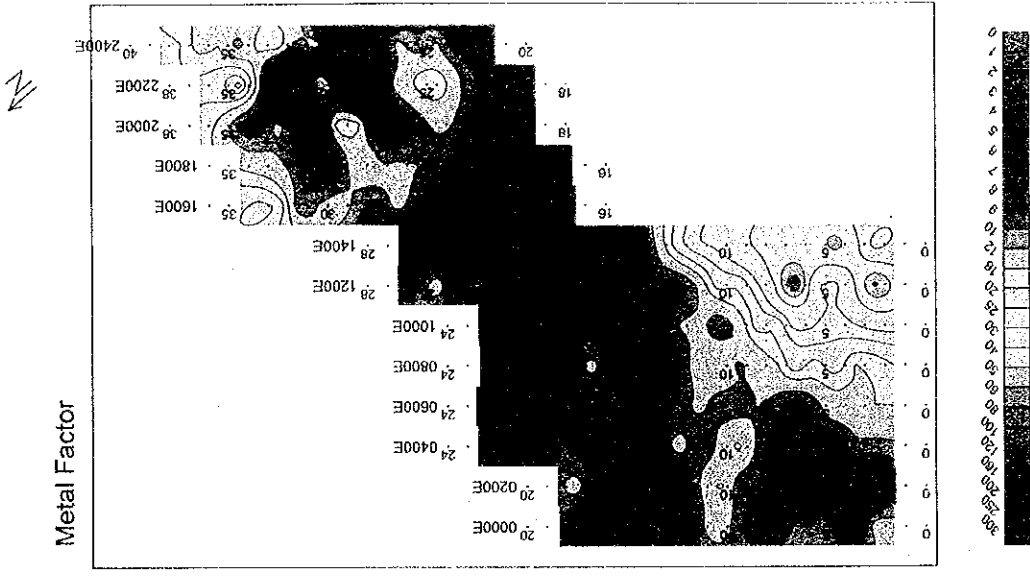
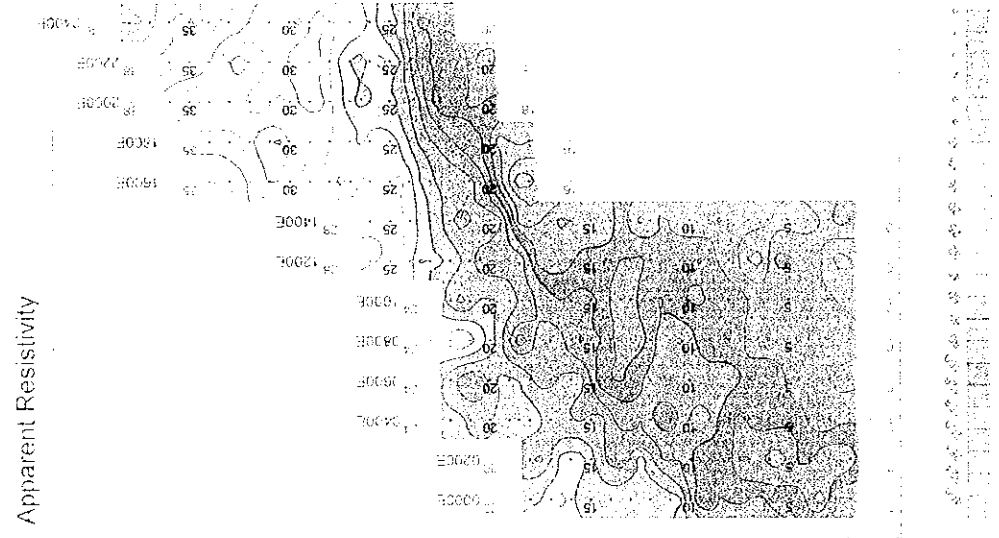
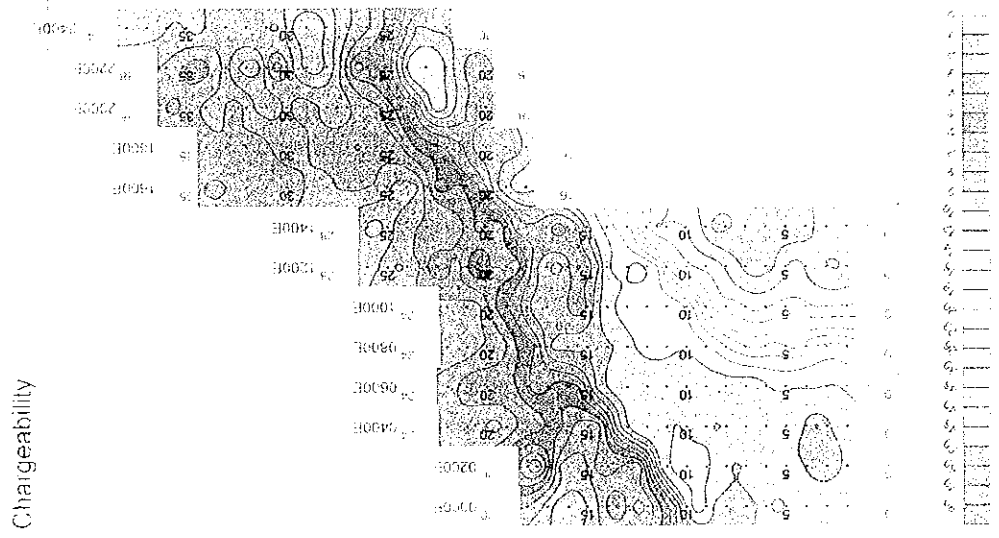
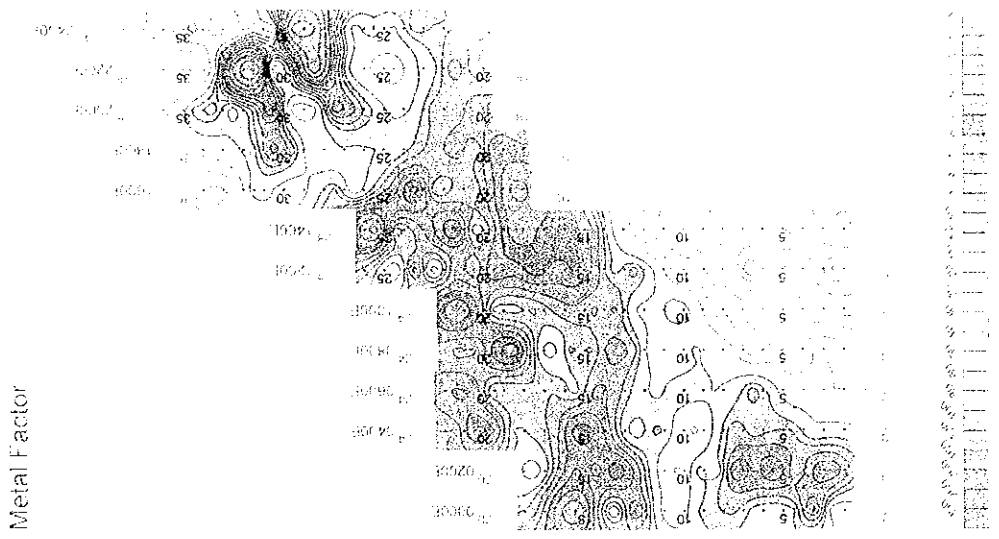


Fig. II-2-10 IP plane map of n=3 in Ghuzayn area(East)



5000 4500 4000 3500 3000

Fig. II.2.10 - IP plane map of  $\rho_{a\gamma}$  in Cibuzayn area (AST)



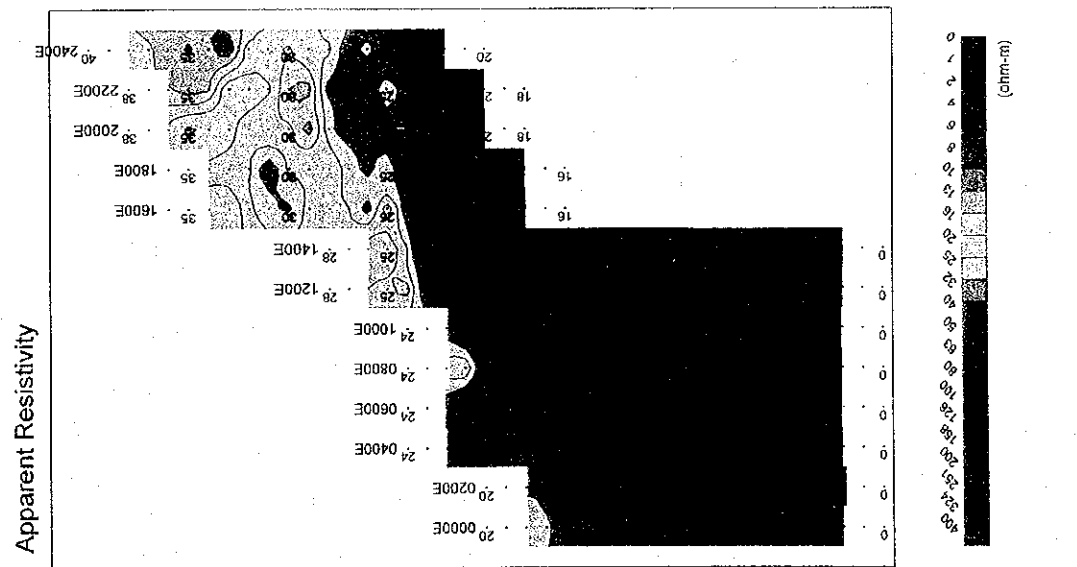
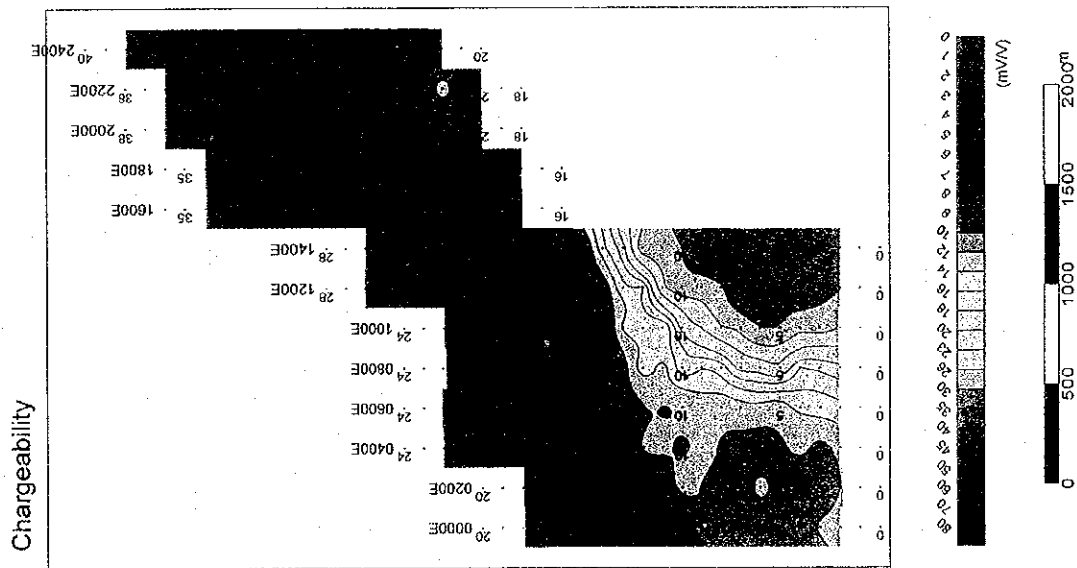
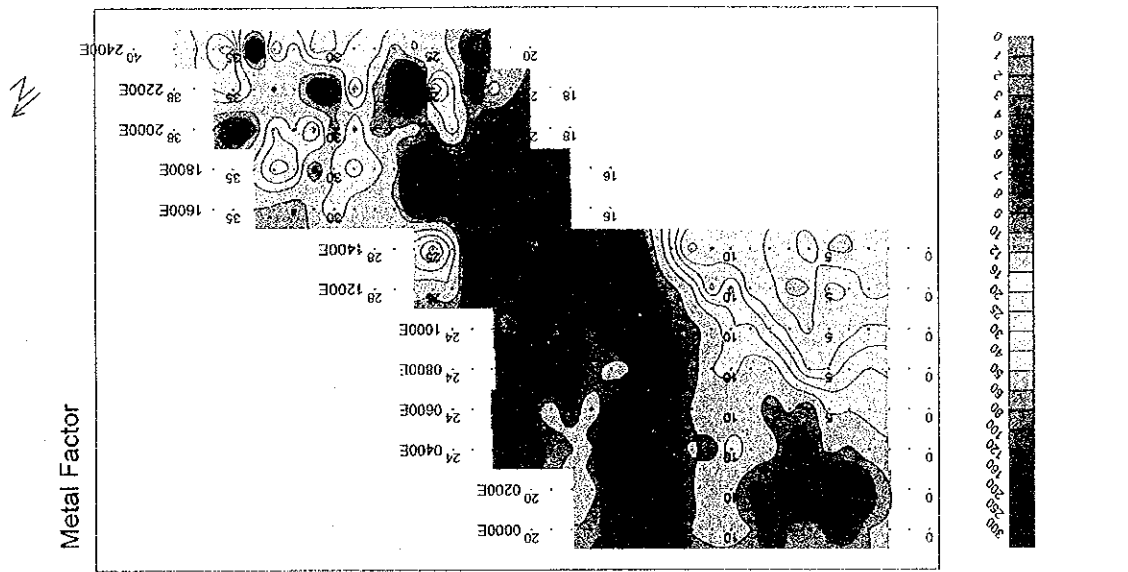


Fig. II -2-11 IP plane map of n=4 in Ghuzayn area(East)

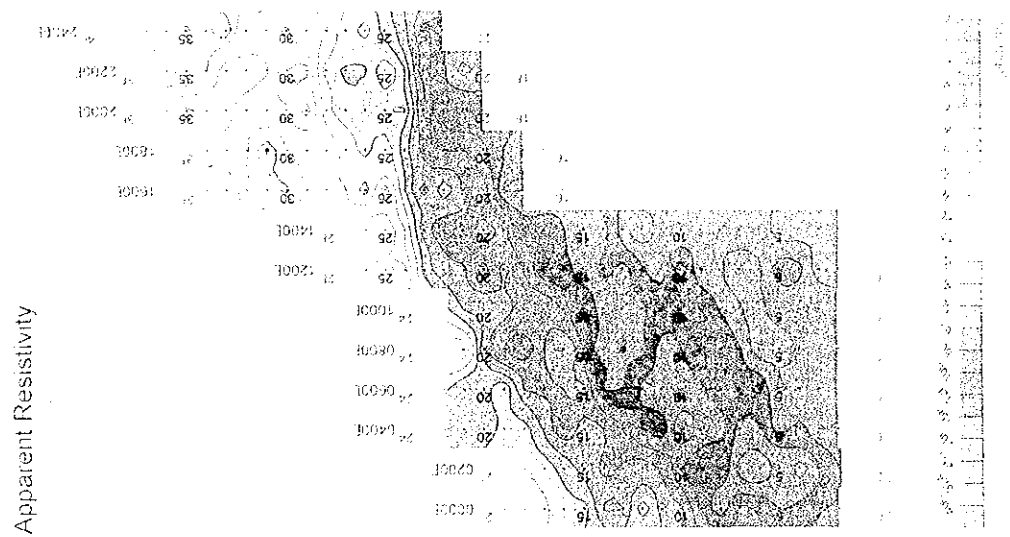
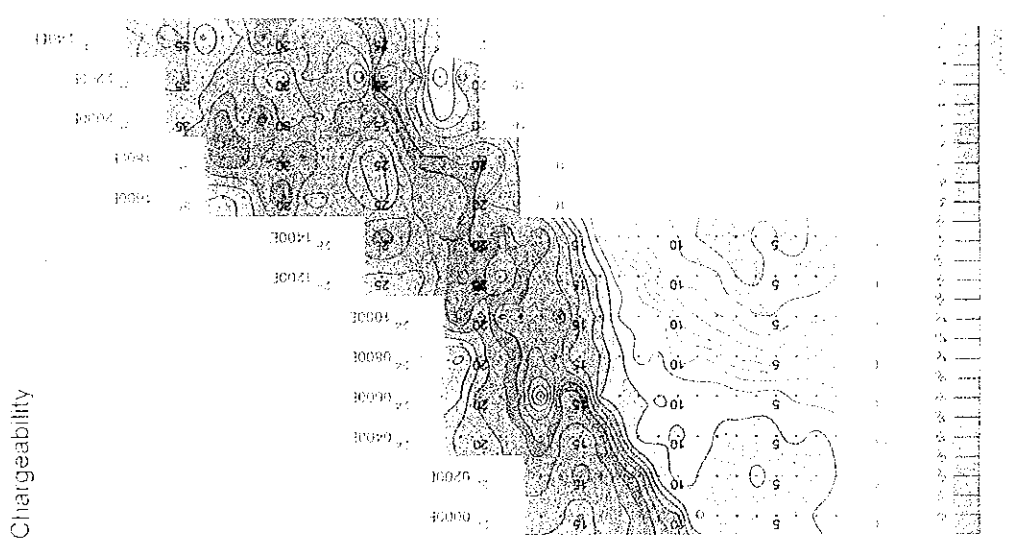
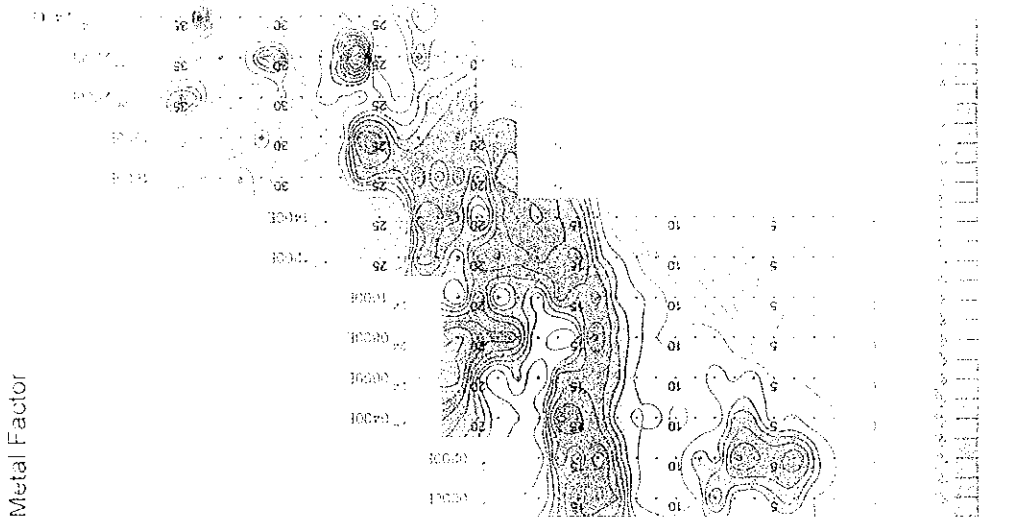


Fig. II-2-11 IP plate map of n=4 in Chirazyn area (east)





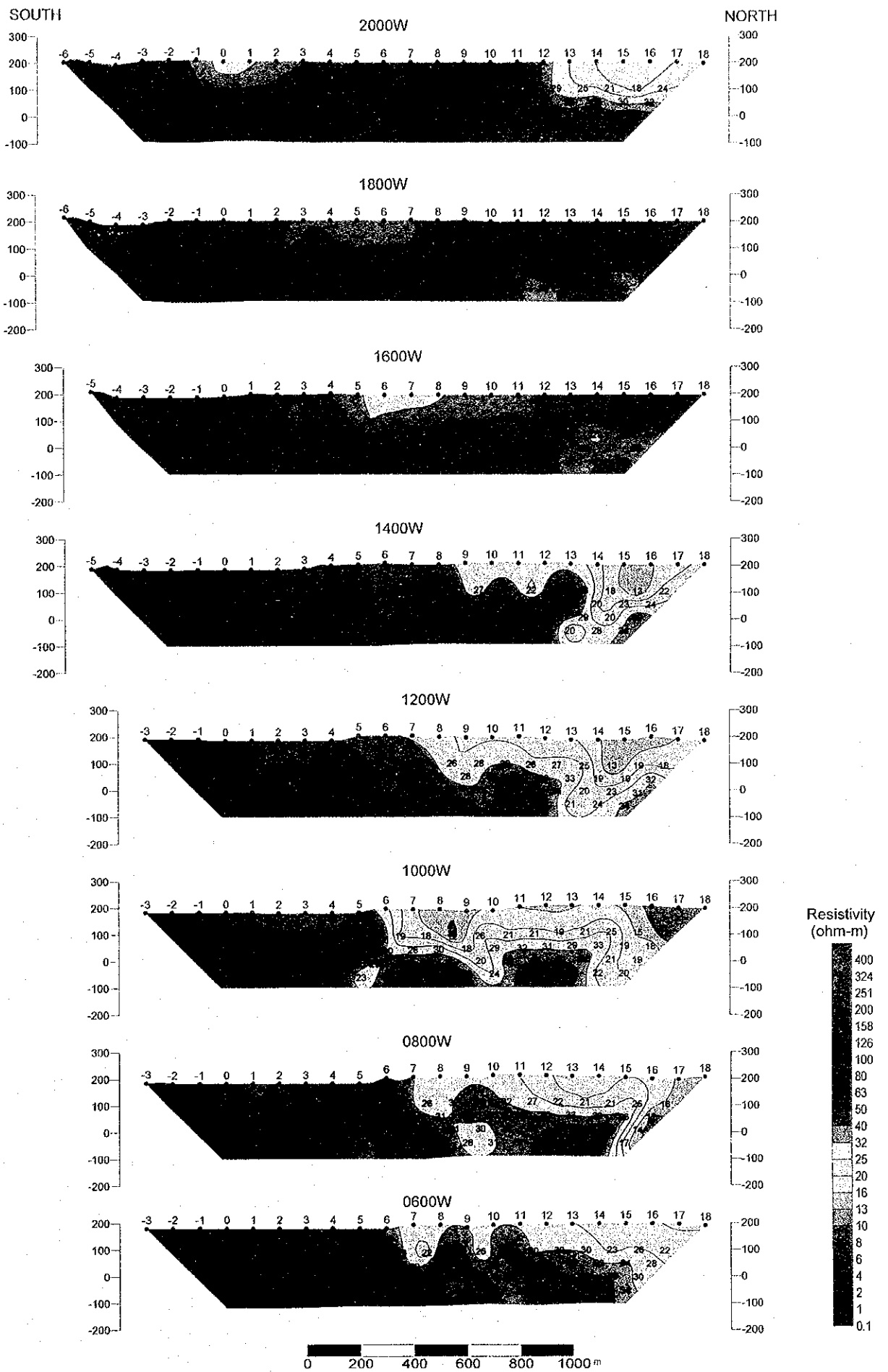


Fig. II-2-12 Apparent resistivity pseudo-sections in Ghuzayn area(West)

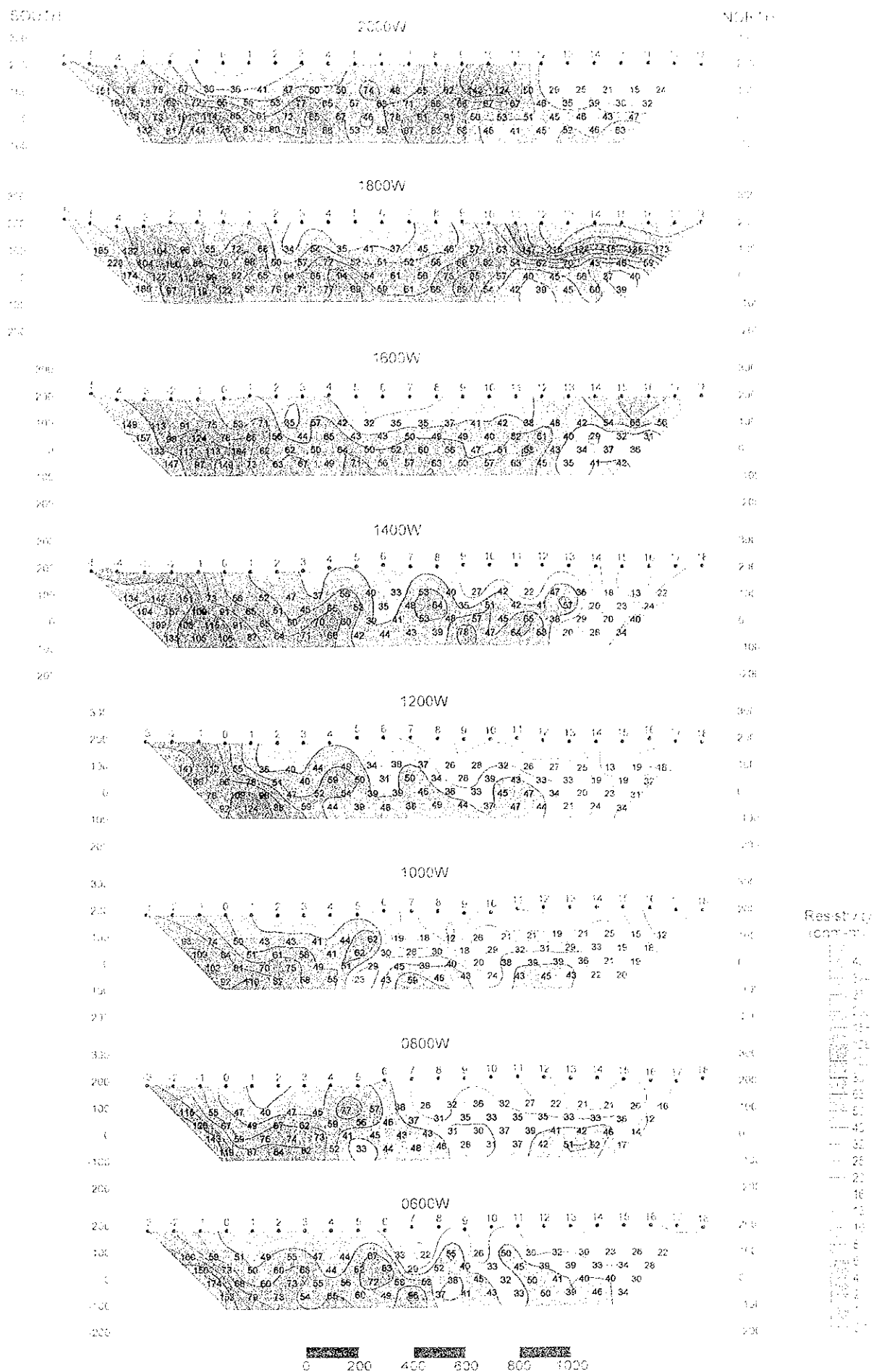
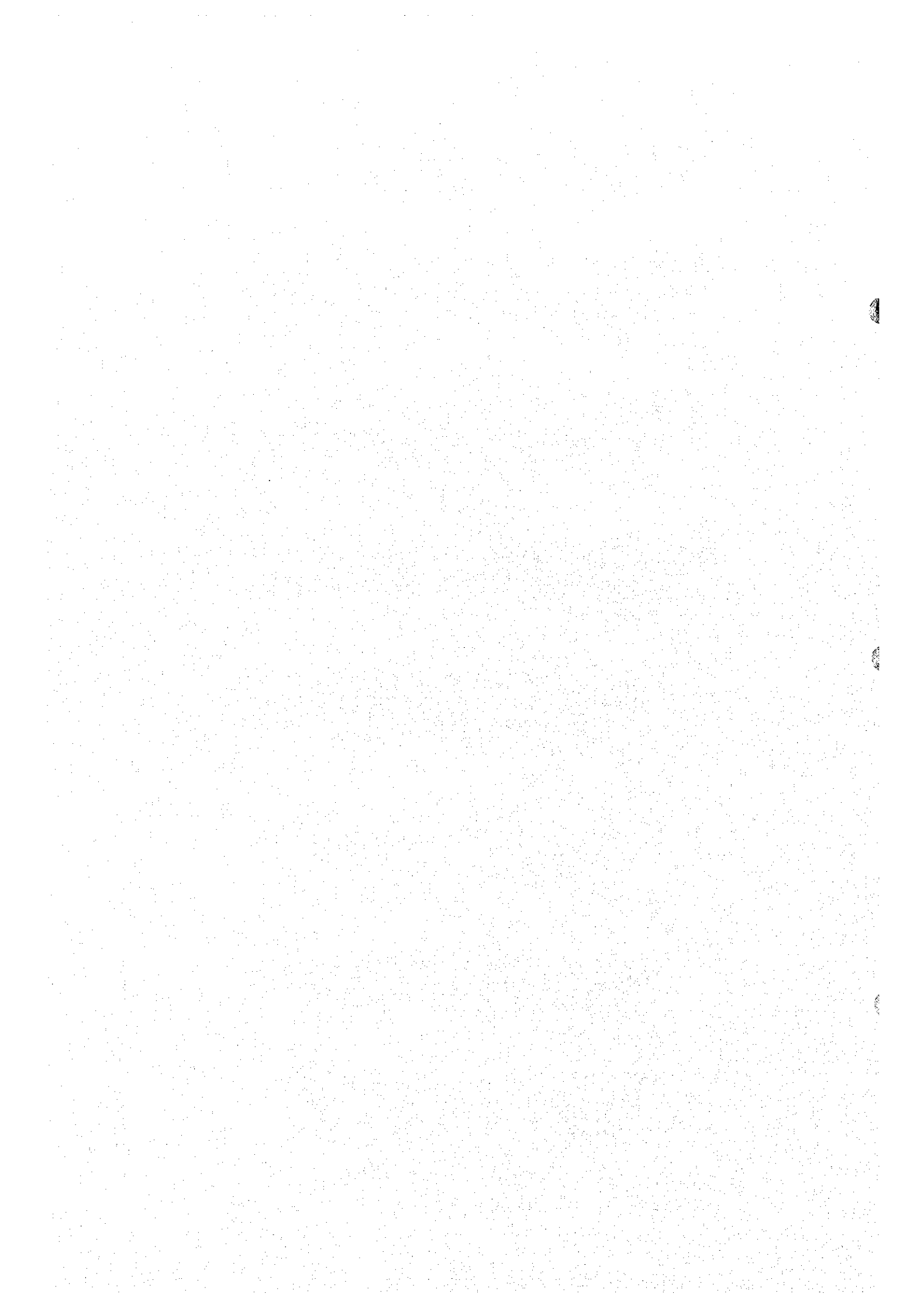


Fig. W-2-12 Apparent resistivity pseudo-sections in Ghuzayn area (West)



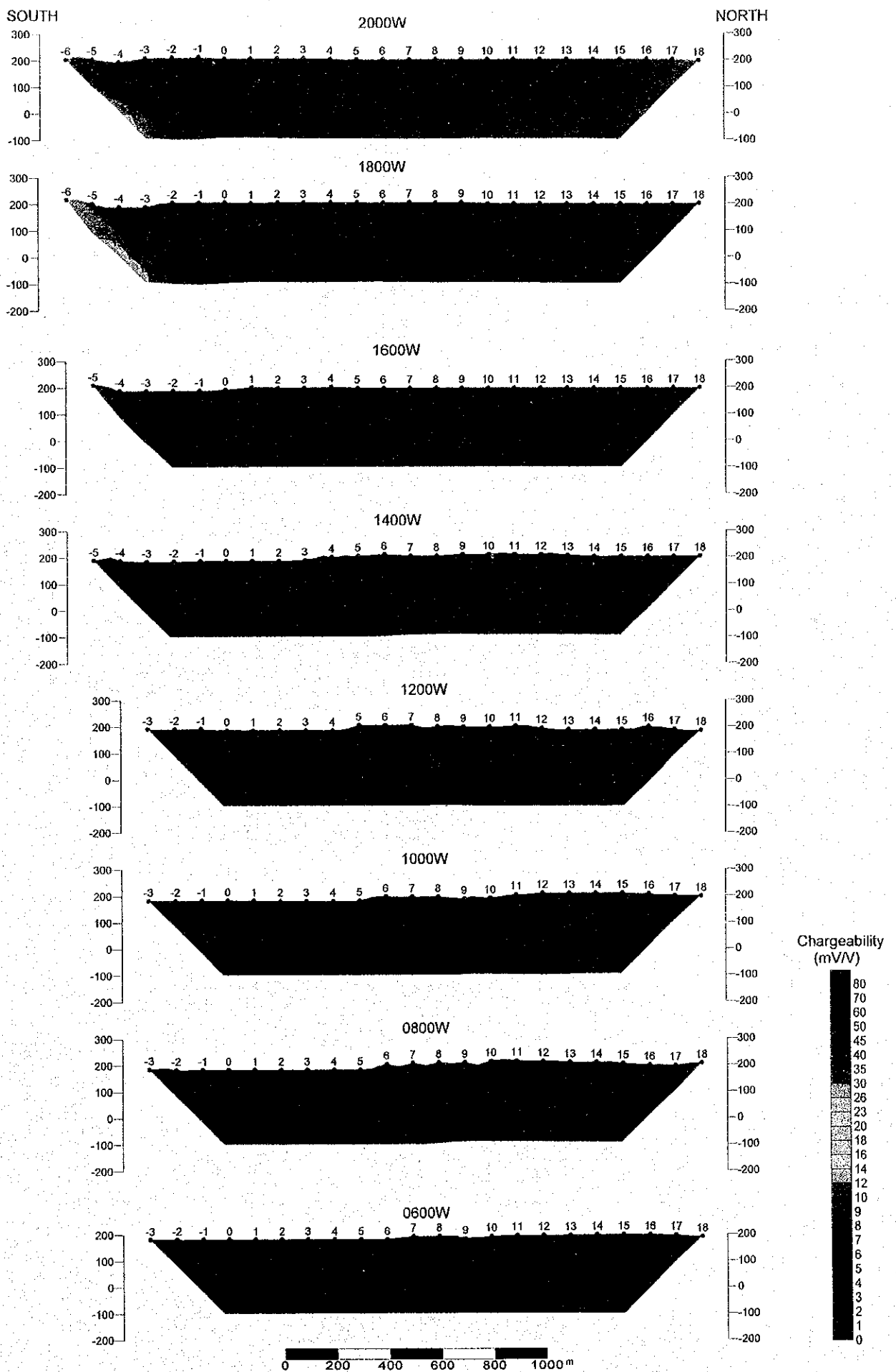


Fig. II-2-13 Chargeability pseudo-sections in Ghuzayn area(West)

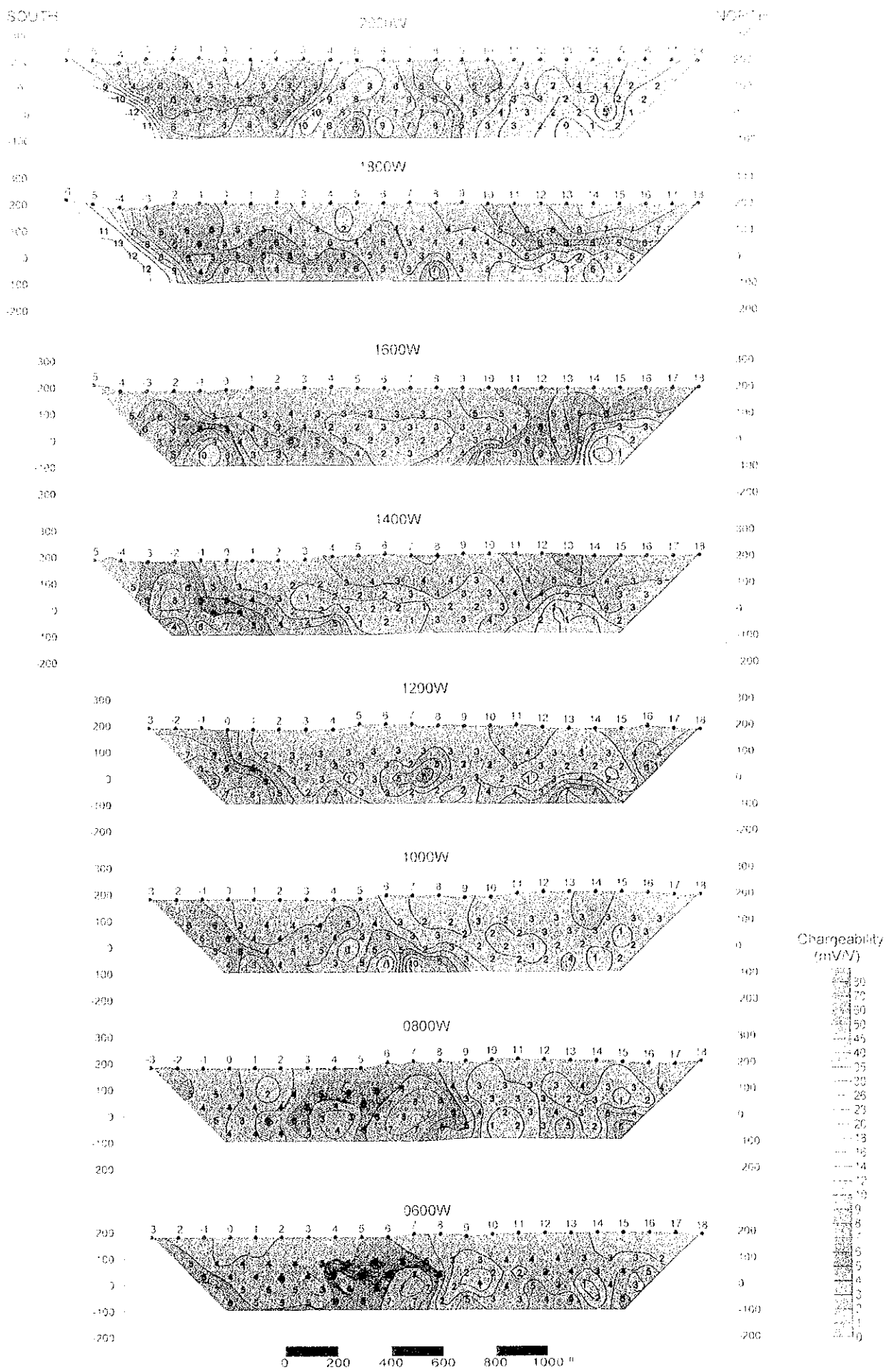


Fig. II -2-13 Chargeability pseudo-sections in Ghuzayn area(West)



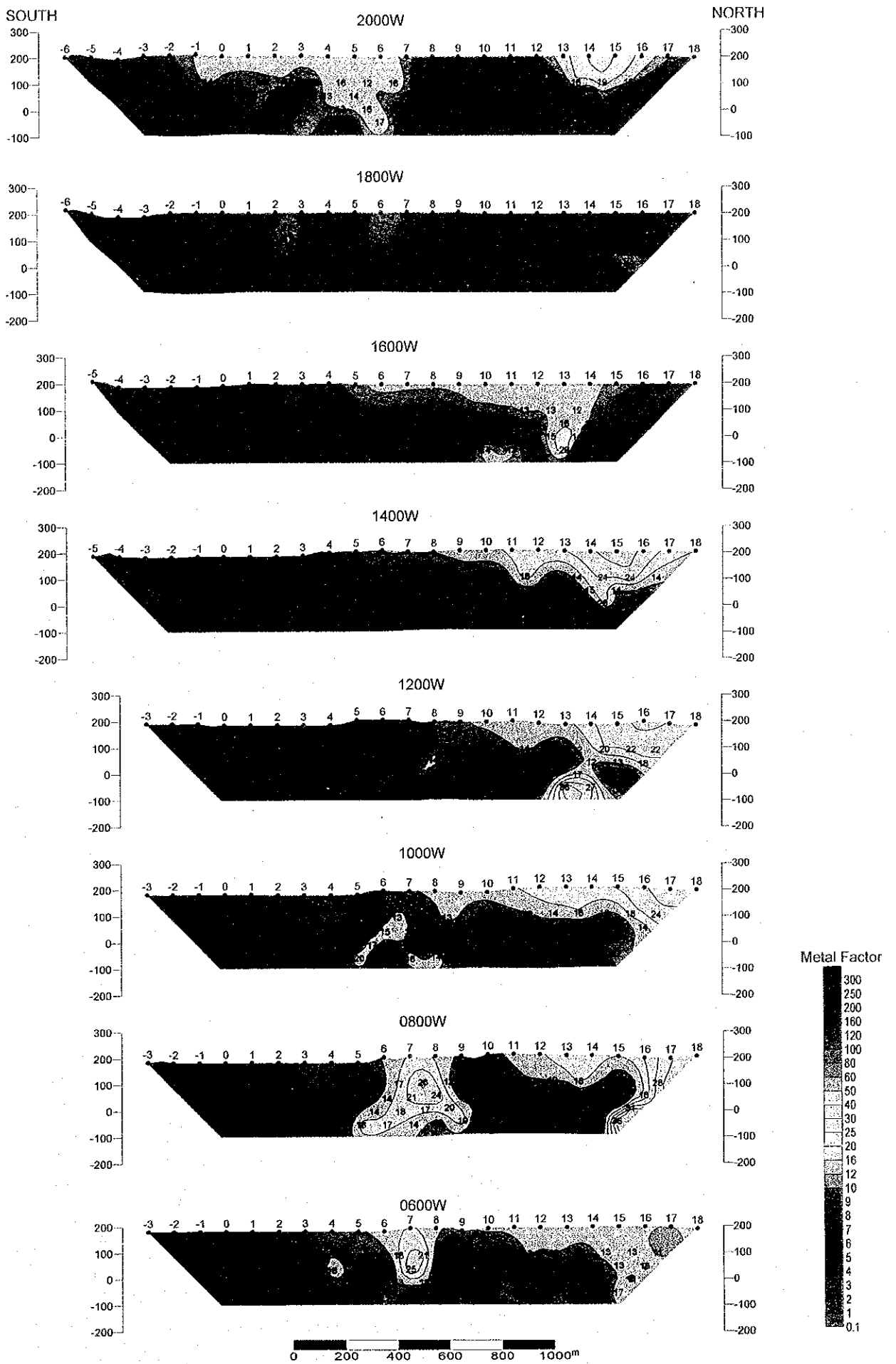


Fig. II -2-14 Metal factor pseudo-sections in Ghuzayn area(West)



Fig II-2-14 Metal factor pseudo-sections in Ghuzayn area(West)





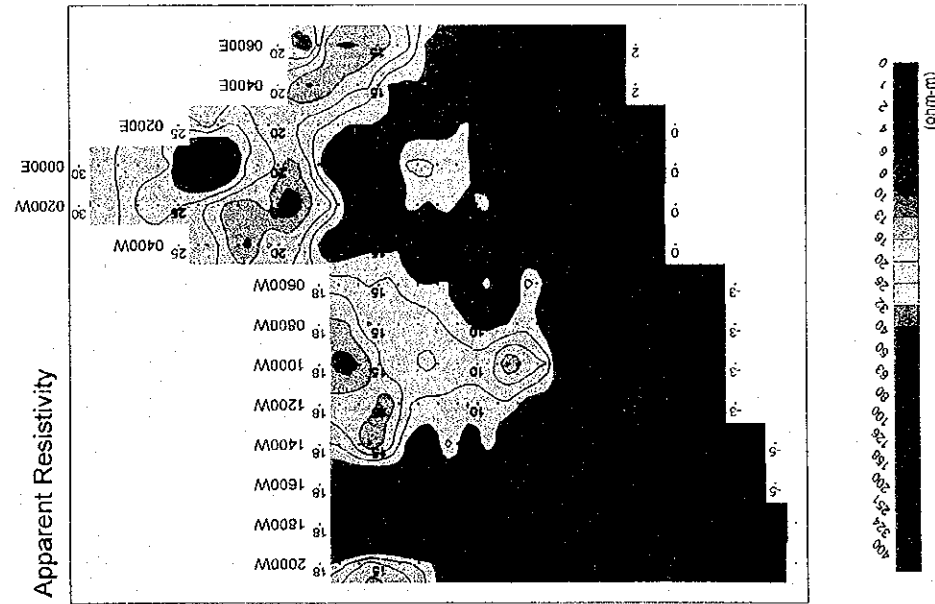
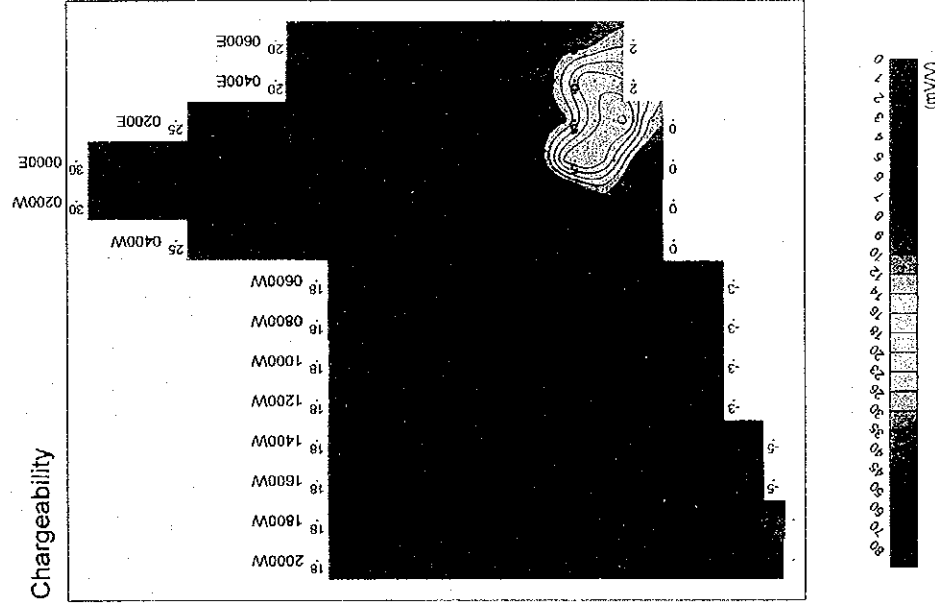
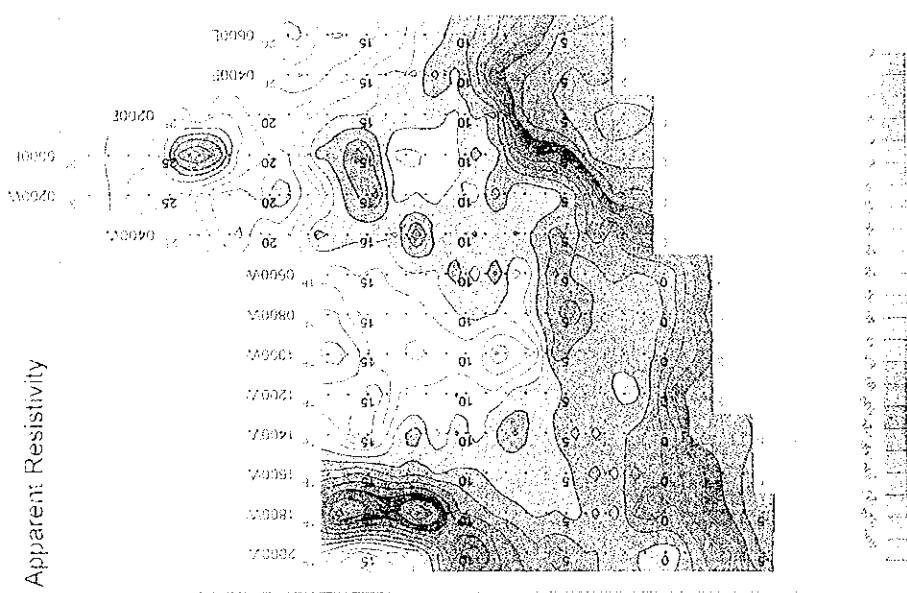
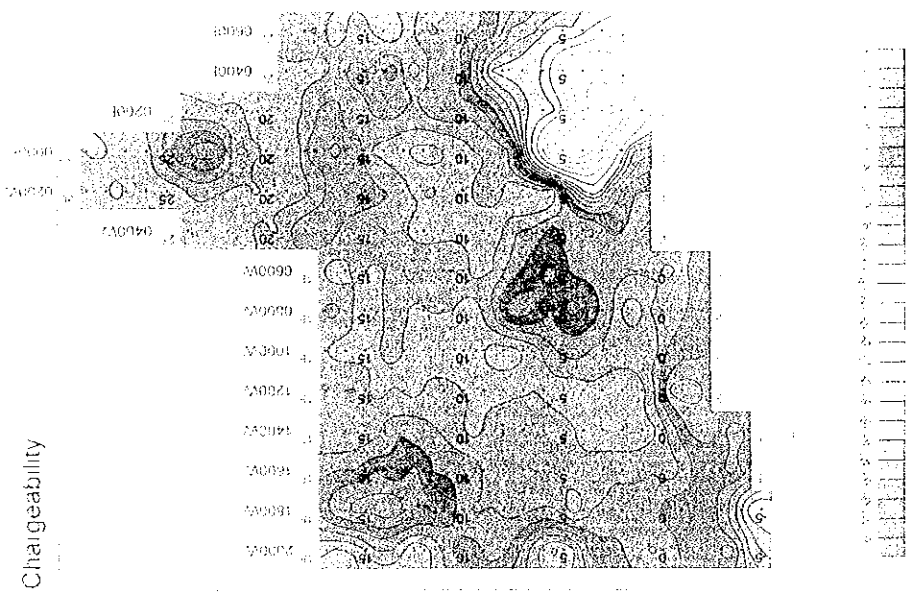
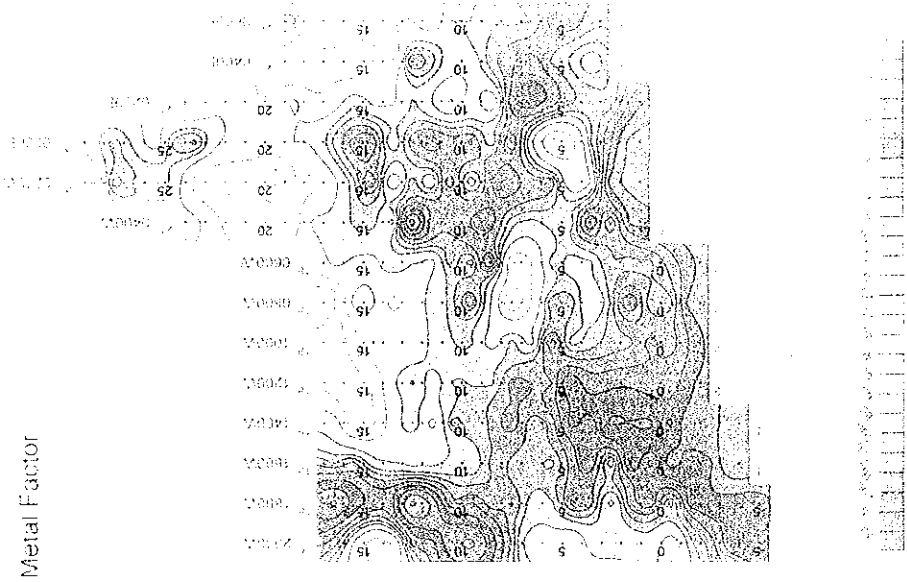


Fig. II -2-15 IP plane map of n=1 in Ghuzayn area(West)



0 500 1000 1500 2000

Fig. II-2-15 IP plane map of tr-1 in Chazayn area West



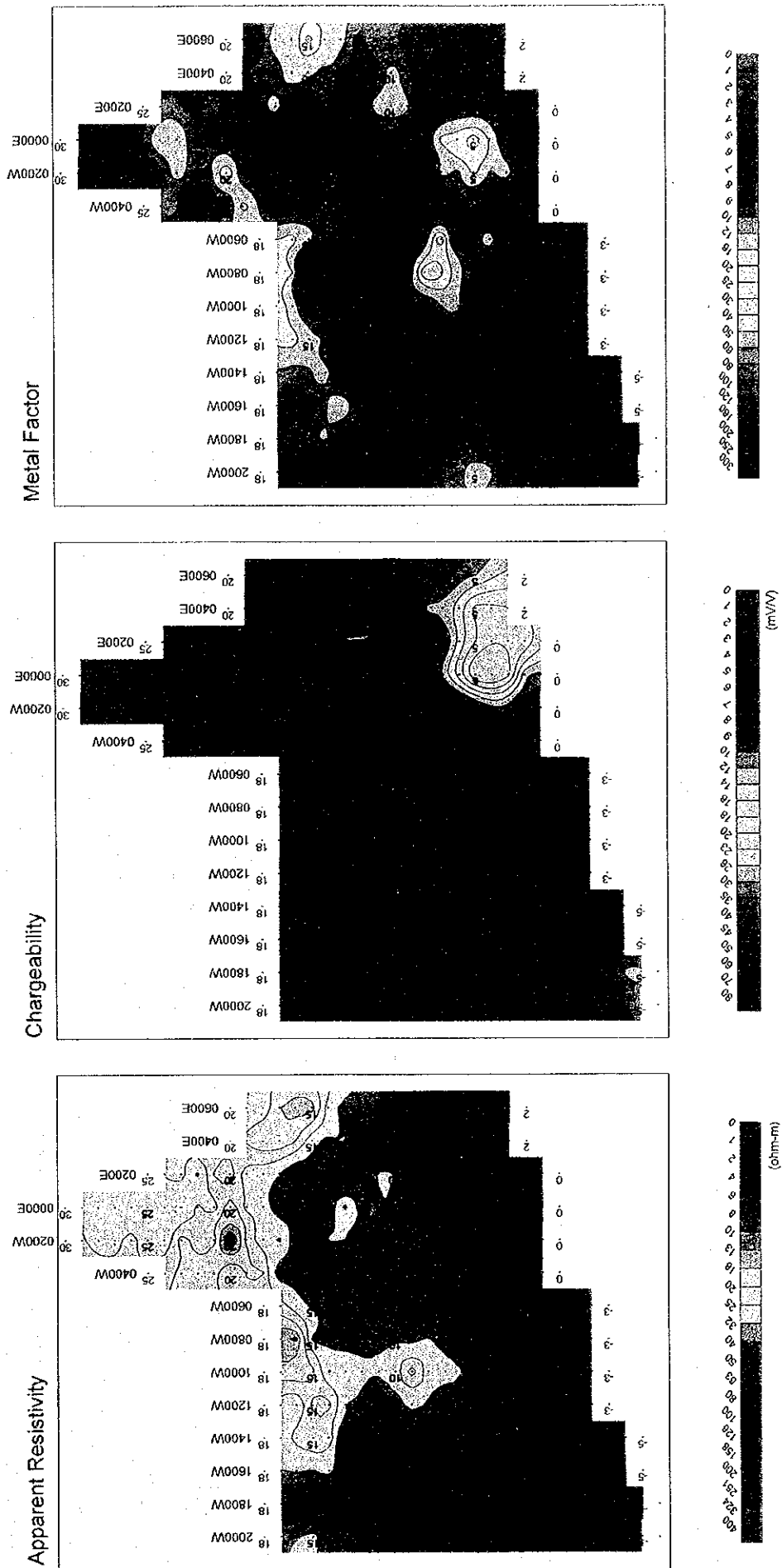


Fig. II -2-16 IP plane map of  $n=2$  in Ghuzayn area(West)

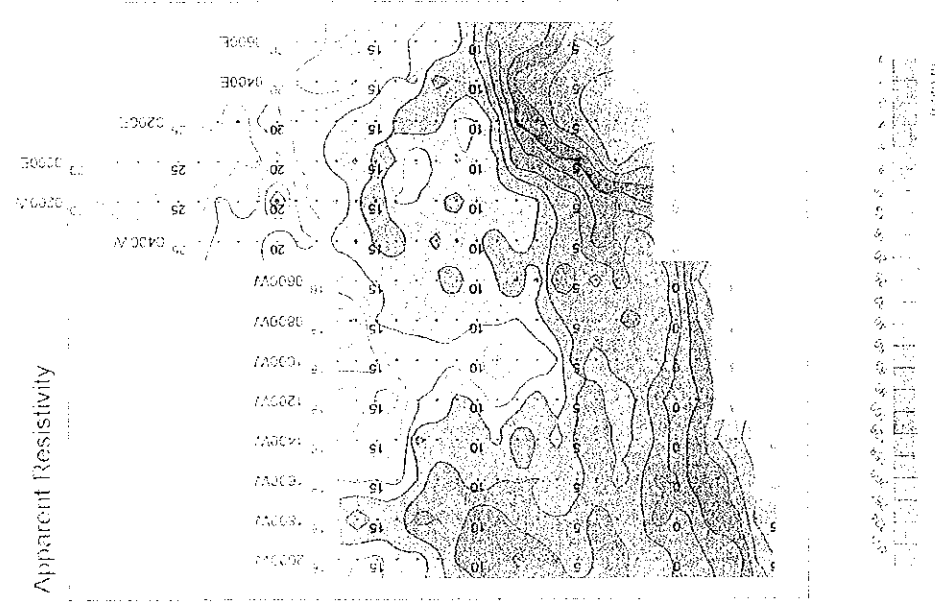
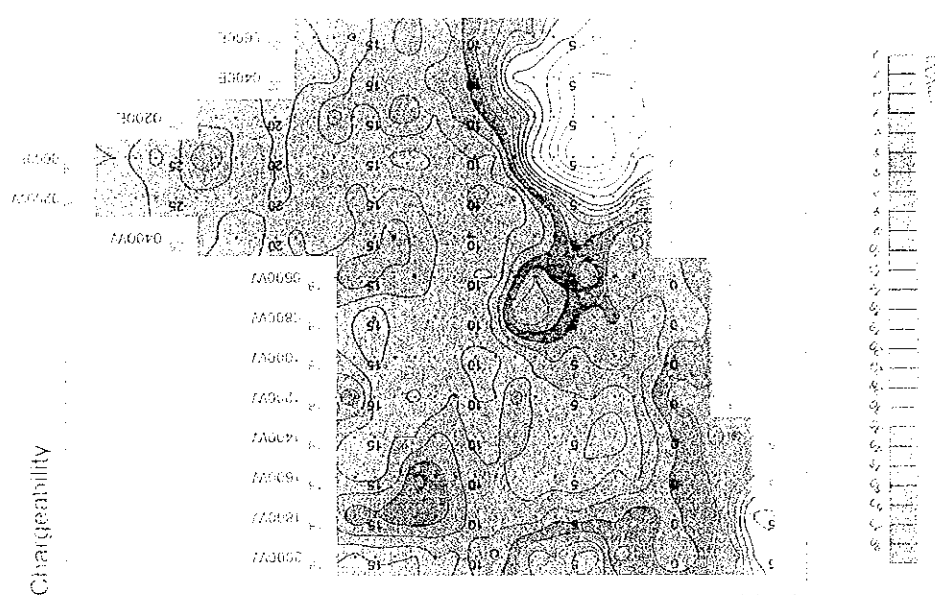
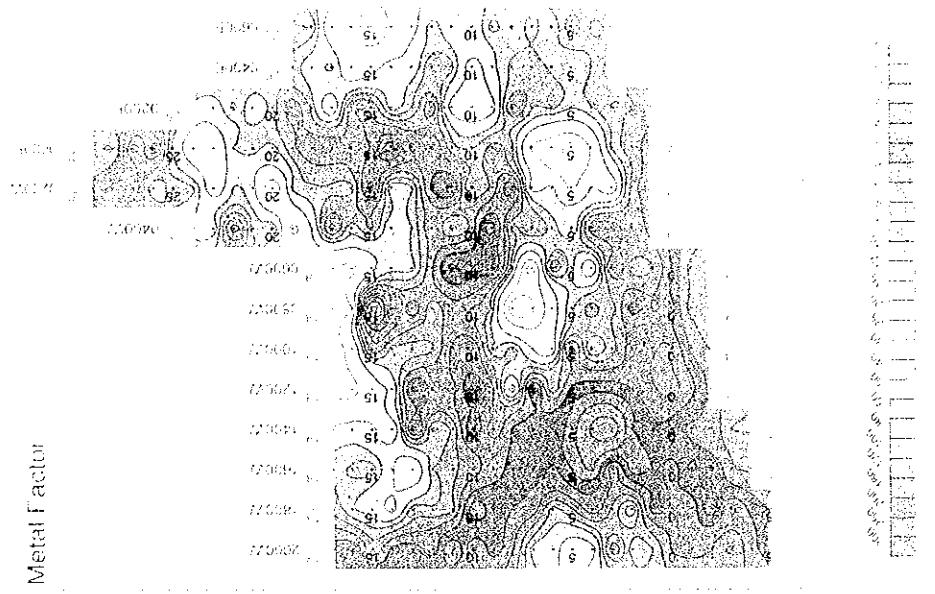


Fig. H 2.16 IP plane map of n. 2 in Ghuzayn area (West)

