

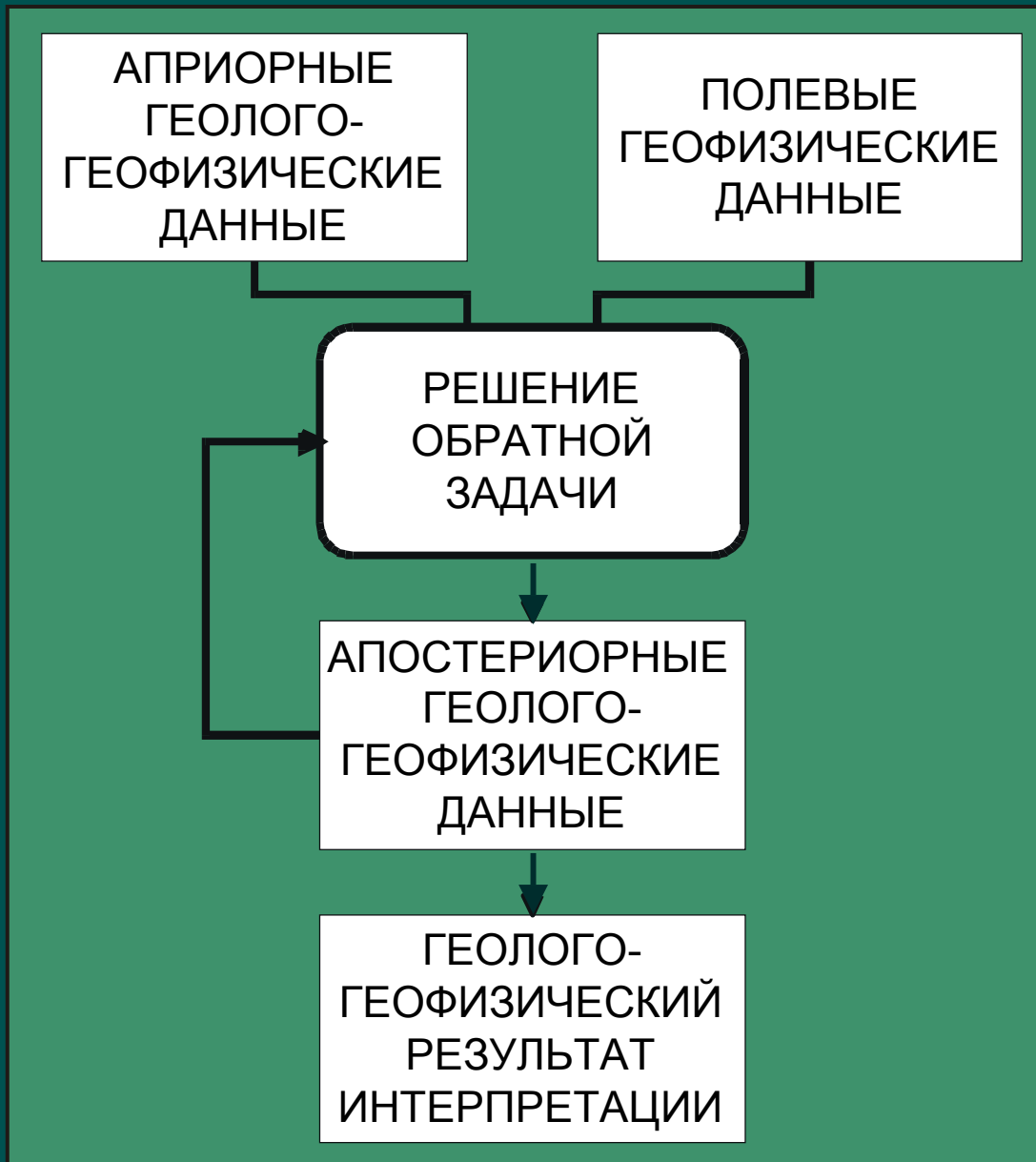
**Решение прямых и обратных
задач электроразведки
методом сопротивлений для
сложно-построенных
неоднородных сред**

Структура работы

- Глава 1. Развитие систем интерпретации данных ВЭЗ на ЭВМ
- Глава 2. Развитие метода вторичных зарядов для расчета поля постоянного тока в неоднородных средах
- Глава 3. Электростатические искажения кривых ВЭЗ при бесконтактных методиках измерения
- Глава 4. Примеры решения практических задач

Глава 1. Развитие систем интерпретации данных ВЭЗ на ЭВМ

- §1. Обзор особенностей использования ЭВМ при одномерной интерпретации данных ВЭЗ
 - 1. Учет априорных данных
 - 2. Профильная и площадная интерпретация
 - 3. Критерии оценки результатов интерпретации
 - 4. Использование алгоритмов автоматической инверсии для экспресс-трансформации кривой ВЭЗ и автоматической минимизации
 - 5. Визуализация профильных данных
- §2. Описание компьютерной система одномерной интерпретации "IP1"
 - 6. Предварительная обработка и анализ данных вертикальных электрических зондирований
 - 7. Алгоритмы автоматической инверсии
 - 8. Интерактивный подбор
 - 9. Информационно-статистический и геологический анализ результатов интерпретации

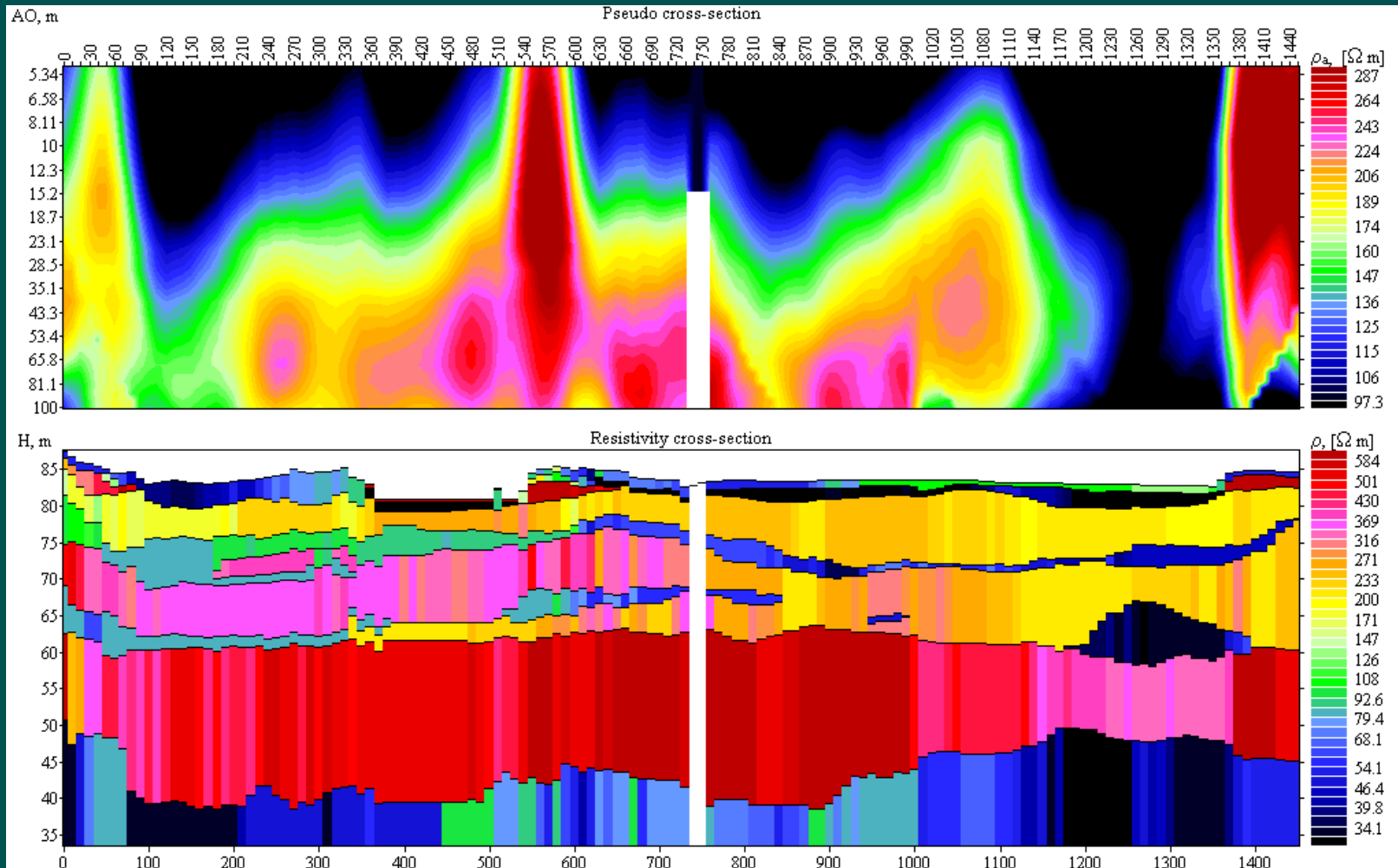


Общая схема интерпретации геофизических данных

Этапы интерпретации

- Предварительная обработка и анализ данных электрических зондирований
- Автоматическая и интерактивная интерпретация и ручной подбор
- Анализ результатов интерпретации

Результат использования системы IPI



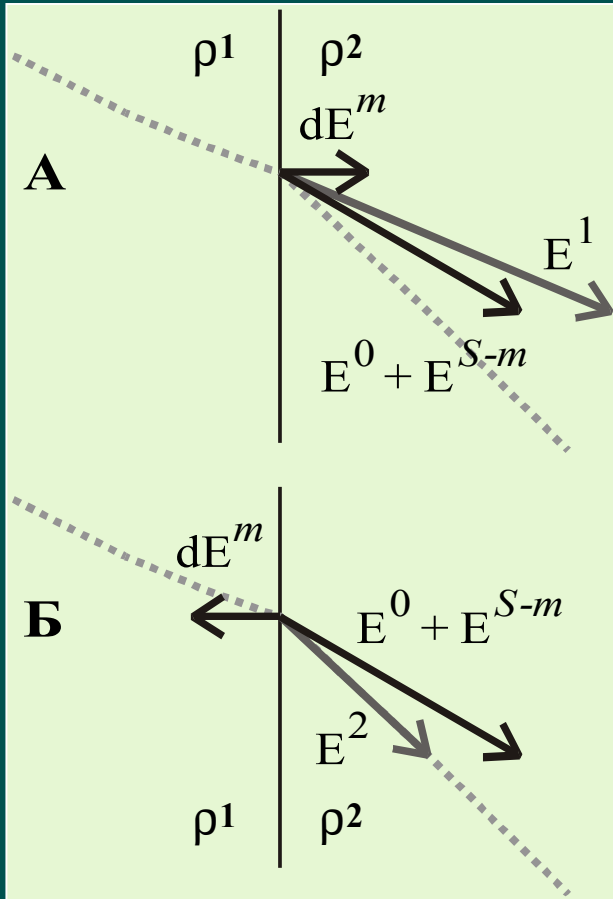
Полевые примеры

- 1. Модин И.Н., Бобачев А.А., Большаков Д.К., Горбунов А.А., Перваго Е.В. Изучение нефтяного загрязнения на Московском НПЗ в Капотне методами электроразведки. Тезисы докладов Международной конференции по экологии, Дубна, май-95.
- 2. Модин И.Н., Бобачев А.А., Большаков Д.К. Изучение отходов птицефабрики и их экологических последствий с помощью электроразведки. Тезисы докладов Международной конференции по экологии, Дубна, май-95.
- 3. А.А.Бобачев, Д.К.Большаков, А.А.Горбунов, И.Н.Модин, Е.В.Перваго, В.А.Шевнин, Д.Л.Коларов. Возможности электроразведки при экологических исследованиях. Международная конференция SEG-EАГО-EАEG в г.С.-Пб. 10-13 июля 1995 г.
- 4. Коларов Д., Бобачев А.А., Большаков Д.К., Горбунов А.А., Модин И.Н., Шевнин В.А. Экологические исследования свалки ТБО в г.Калуге. Тезисы докладов на Ежегодной международной конференции "Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электроразведочных полей" 21-25 янв. 1996 г. г.Воронеж.
- 5. Модин И.Н., Шевнин В.А., Бобачев А.А., Большаков Д.К., Горбунов А.А., Марченко М.Н., Урсова А.В. Изучение нефтяного загрязнения от НПЗ в гг.Москве, Сызрани и Новокуйбышевске электроразведкой. Тезисы докладов на Ежегодной международной конференции "Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электроразведочных полей" 21-25 янв. 1996 г. г.Воронеж.
- 6. Modin I.N., Shevnin V.A., Bobatchev A.A., Bolshakov D.K., Gorbunov A.A. Investigations of oil pollution, caused by oil-industrial plants with electrical prospecting methods. Annales Geophysicae. European Geophysical Society. Part 1. Society Symposia, Solid Earth Geophysics & Natural Hazards. Supplement 1 to Volume 14. Hague, May 1996, The Netherlands. P.171.
- 7. Bobatchev A.A., Bolshakov D.K., Modin I.N., I.N.Shevnin I.N., Vladov M.L. Ecological studies in urban regions with electrical methods. Russian-German seminar "Actual problems in deep EM studies". - Moscow, March 11-15, 1997, p.61-62.
- 8. Sidorin A.Y., Modin I.N., Desherevsky A.V., Bobachev A.A.. A new approach to construction of the base geoelectric section in earthquake prediction research // // III International Workshop on Magnetic, Electric and ElectroMagnetic Methods in Seismology and Volcanology (MEEMSV-2002). September 3-6, 2002, Moscow, Russia / Abstracts. P.52-54.
- 9. Zhamaletdinov A.A., Semenov V.Yu., Shevtsov A.A., Tokarev A.D. and Bobachev A.A. Geoelectrical structure of the Baltic shield and its vicinity through the lithosphere and mantle". Acta Geophysica Polonica, 2002, No 4, p. 583-606.

Глава 2. Развитие метода вторичных зарядов для расчета поля постоянного тока в неоднородных средах

- §1. Основы метода и решаемые интегральные уравнения
- §2. Учет рельефа земной поверхности при численном моделировании методом вторичных зарядов
- §3. Моделирование поля постоянного тока для линейного источника
- §4. Представления результатов двумерного моделирования электрического поля с помощью токовых линий
- §5. Использование квадратичной аппроксимации плотности вторичных зарядов для повышения точности двумерного моделирования

Метод вторичных зарядов



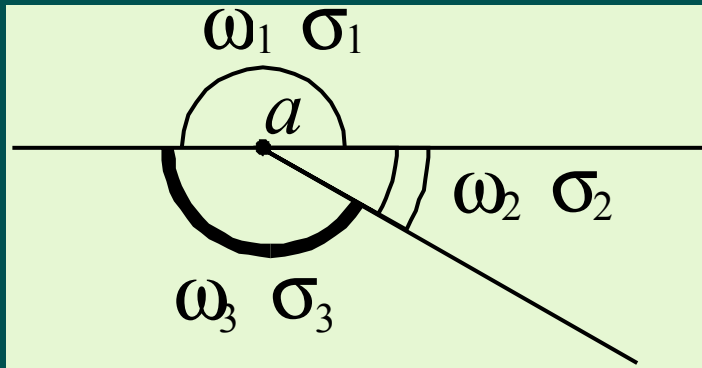
$$\frac{\Sigma(m)}{\epsilon_0} = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} (E_n^2(m) + E_n^1(m)) = 2 \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} E_n^{cp}(m)$$

$$\frac{\Sigma(m)}{\epsilon_0} = K(m) \left(E_n^0(m) - \int_{S-m} \frac{\Sigma(s)}{\epsilon_0} \frac{\partial G(s, m)}{\partial n} ds \right)$$

$$\frac{\Sigma(m_i)}{\epsilon_0} = K(m_i) \left(E_i^0(m_i) + \sum_{j, j \neq i}^N E_i^j(m_i) \right),$$

Линия тока и электрическое поле на границе в первой среде (А) и во второй среде (Б)

Расчет первичного поля для неоднородных сред

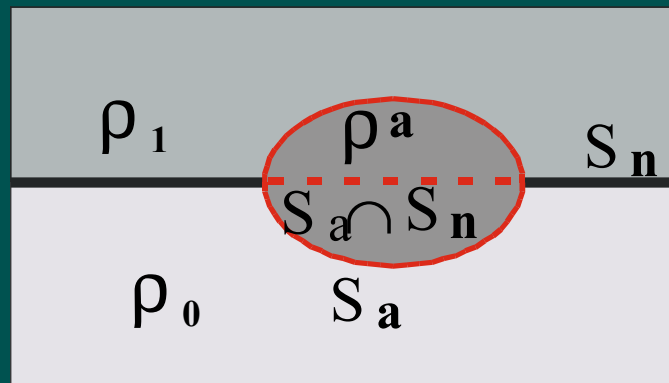
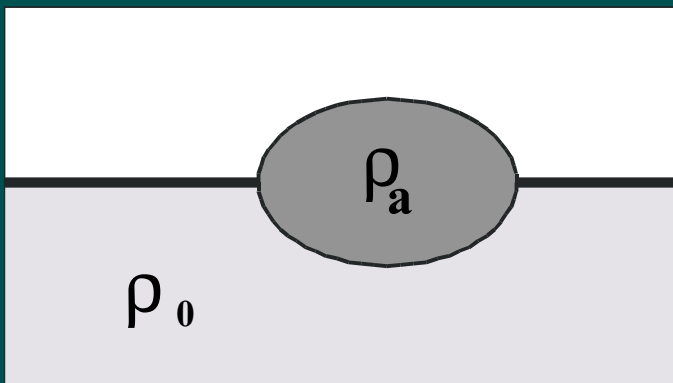
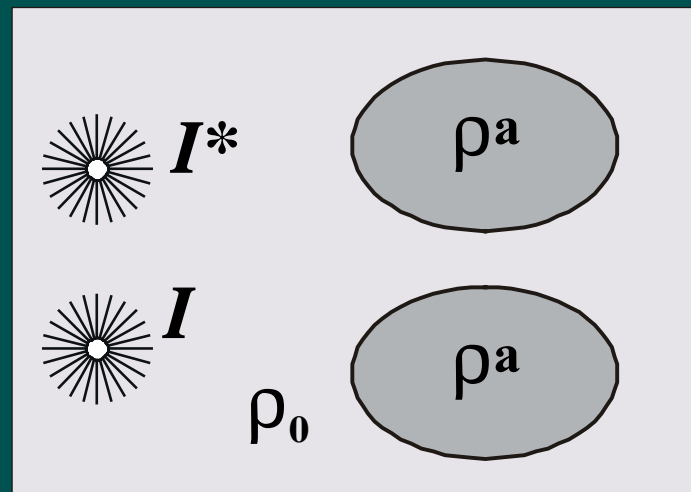
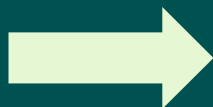
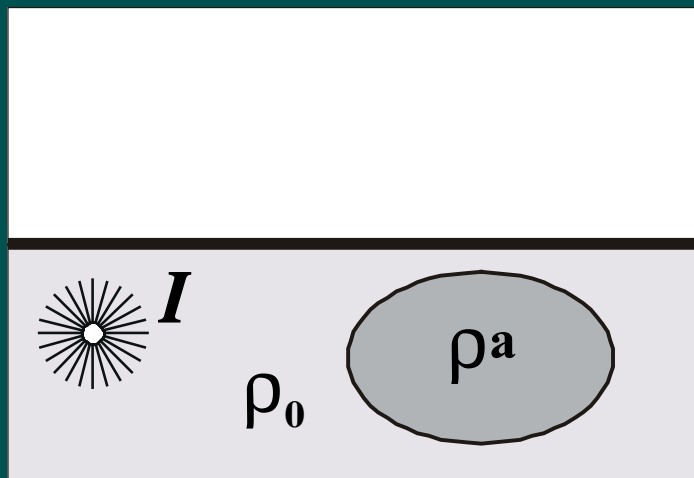


Секторальное распределение электропроводности

$$U^0(m) = \frac{I}{\sigma_{cp}(a)} G(a, m)$$

$$\sigma_{cp} = \frac{1}{4\pi} \sum_t^n \omega_t \sigma_t$$

Особенности интегральных уравнений при использовании функции Грина для нормального разреза



Граница нормального разреза (S_n) и граница неоднородностей (S_a).

Функции Грина и функция источника для нормального разреза

Функция Грина (потенциал единичного источника тока)

$$\operatorname{div}_m (\sigma^n(m) \cdot \operatorname{grad}_m G^j(a, m)) = -\delta(a, m)$$

$$\mathbf{E}_{\text{норм}}^I(a, m) = -\frac{\sigma_{\text{ср}}^n(a)}{\sigma_{\text{ср}}(a)} I \operatorname{grad}_m (G^j(a, m))$$

Функция источника (потенциал единичного заряда)

$$G^*(a, m) = \sigma_{\text{ср}}^n(a) G^j(a, m)$$

$$\mathbf{E}_{\text{норм}}^I(a, m) = -\frac{I}{\sigma_{\text{ср}}(a)} \operatorname{grad}_m (G^*(a, m))$$

$$d\mathbf{E}_{\text{норм}}^S(s, m) = -\frac{\Sigma(s) ds}{\epsilon_0} \operatorname{grad}_m (G^*(s, m))$$

Пример функции источника

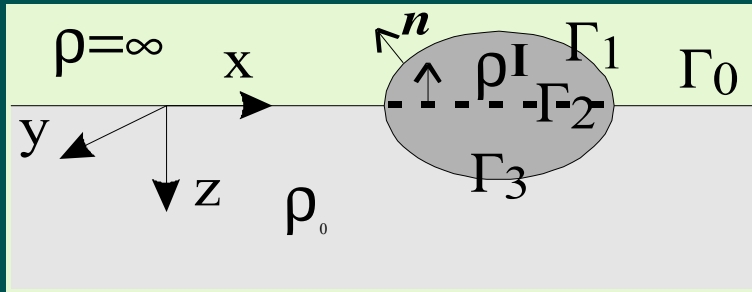
$$G^*(a, m) = \begin{cases} G(a, m) + K(a)G(a^*, m), & z_m \cdot z_a \geq 0, z_a \neq 0; \\ G(a, m) + K(a)G(a, m), & z_m \cdot z_a \leq 0, z_a \neq 0; \\ G(a, m), & z_a = 0; \end{cases}$$
$$K(a) = \frac{\rho(a^*) - \rho(a)}{\rho(a^*) + \rho(a)},$$

$$G^*(a, m) = G(a, m) + \Phi(a, m) = G(a, m) + \int_{S_n} \frac{\Sigma(a, s)}{\epsilon_0} \cdot G(s, m) ds$$

Интегральное уравнение с использованием функции источника

$$\frac{\Sigma(m)}{\epsilon_0} = K^*(m) \left(\overline{\mathbf{E}_n^{\text{норм}}(m)} - \int_{S_{a-m}} \frac{\Sigma(s)}{\epsilon_0} \frac{\partial G(s, m)}{\partial n} ds - \int_{S_a} \frac{\Sigma(s)}{\epsilon_0} \left[\frac{\partial \Phi(s, m)}{\partial n} \right]_{cp} ds \right),$$

Интегральное уравнение с использованием функции источника для модели с рельефом

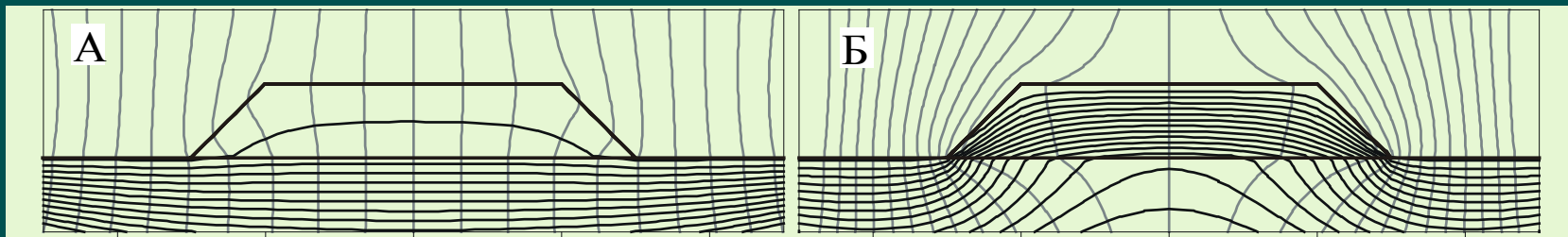
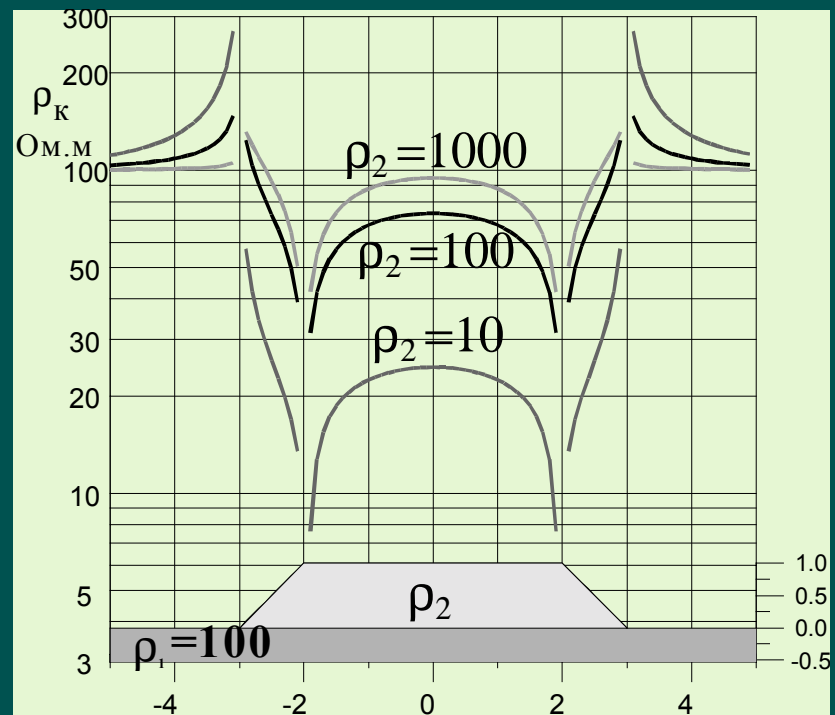
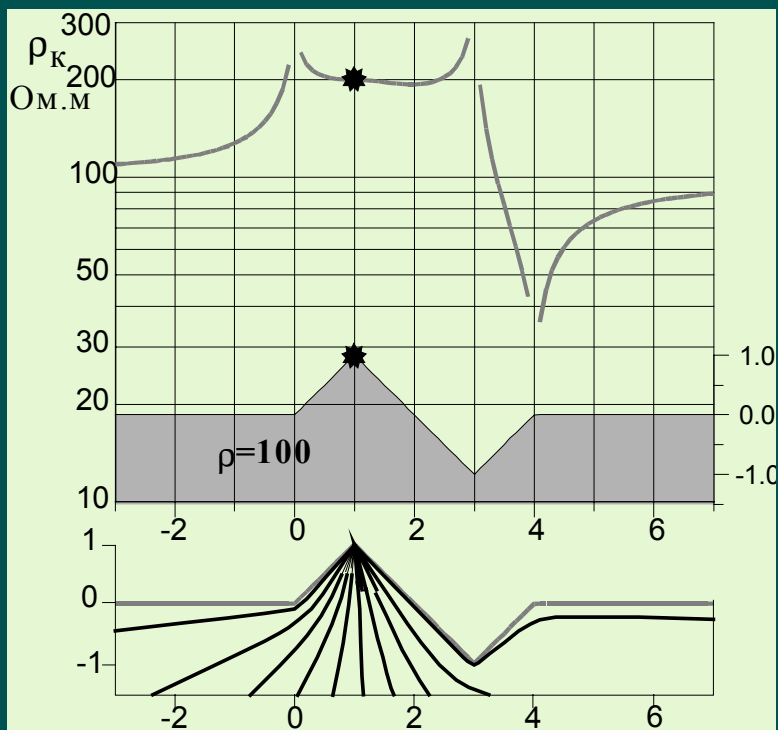


$$\rho(x, y, z) = \begin{cases} \rho^+ = \rho_0, & z > 0; \\ \rho^- = \infty, & z < 0. \end{cases}$$

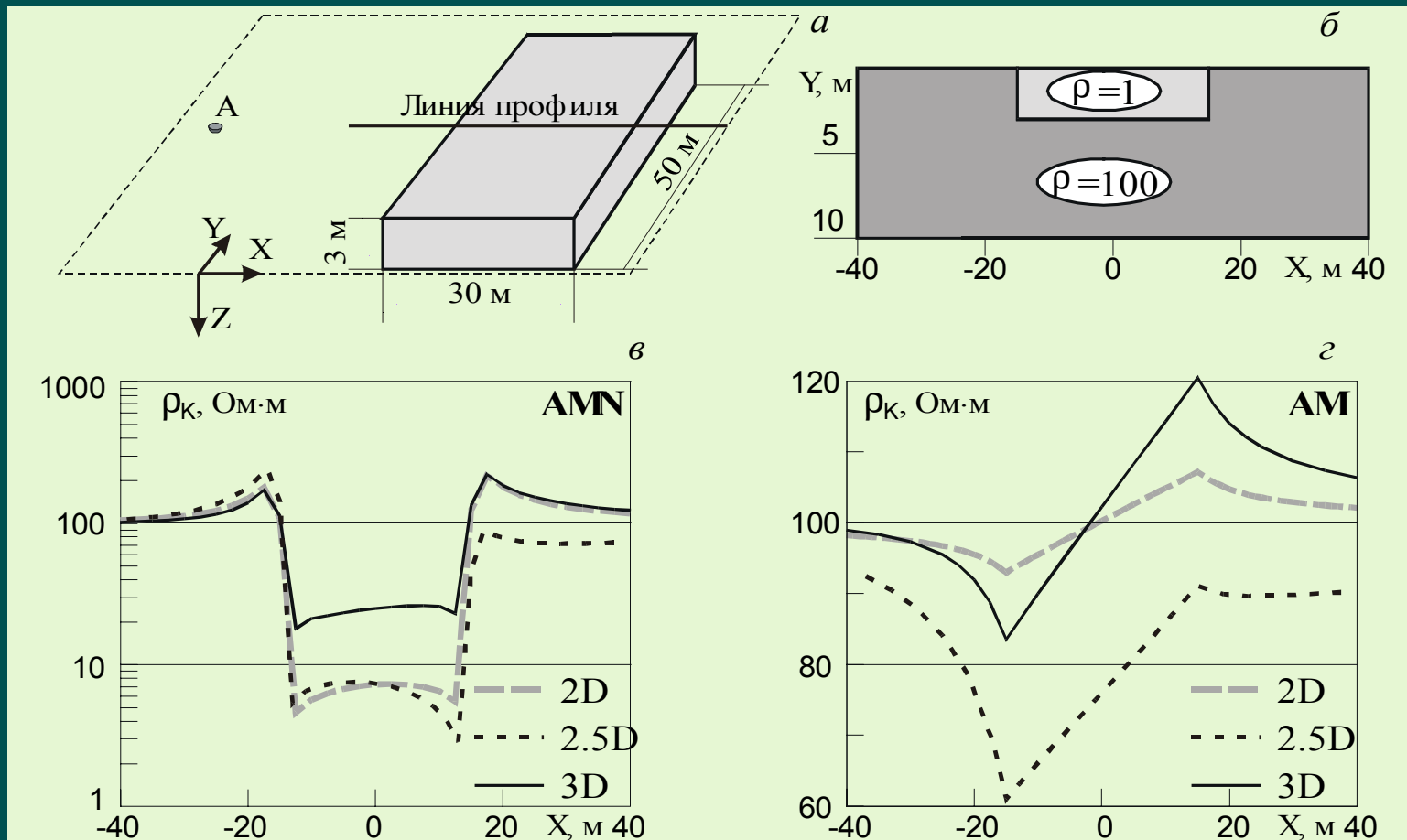
$$G_+^*(a, x) = \begin{cases} G(a, x) + G(a^*, x), & z_x \geq 0; \\ 2 \cdot G(a, x), & z_x \leq 0. \end{cases}$$

$$G_-^*(a, x) = \begin{cases} 0, & z_x \geq 0; \\ G(a, x) - G(a^*, x), & z_x \leq 0. \end{cases}$$

Расчеты моделей с рельефом



Сравнение результатов моделирования моделирования для точечного (2.5D) и линейного (2D) источника тока



Сравнение результатов 2D, 2.5D и 3D моделирования для проводящей неоднородности: 3D модель (а), 2D модель (б), графики кажущегося сопротивления для трехэлектродной (в) и потенциал-установки (г). X координата неподвижного питающего электрода -70.

Комплексный потенциал плотности тока

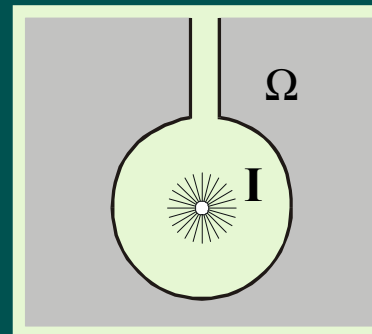
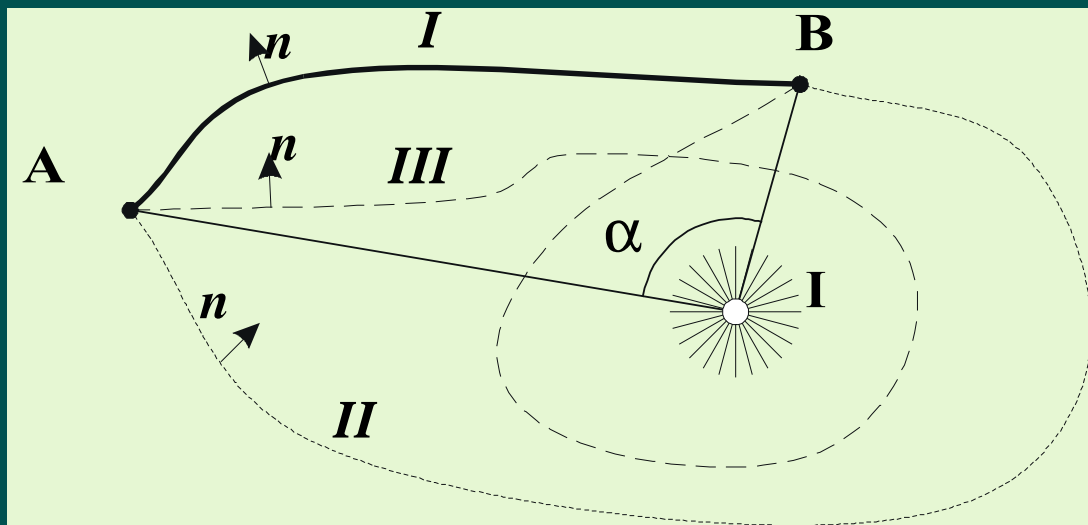
$$\theta(x, y) = \varphi(x, y) + i\psi(x, y) = \frac{1}{\rho} \omega(x, y)$$

$$\frac{\partial \varphi_1}{\rho_1 \partial \tau} = \frac{\partial \varphi_2}{\rho_2 \partial \tau} = \frac{\partial \psi_1}{\rho_1 \partial n} = \frac{\partial \psi_2}{\rho_2 \partial n},$$

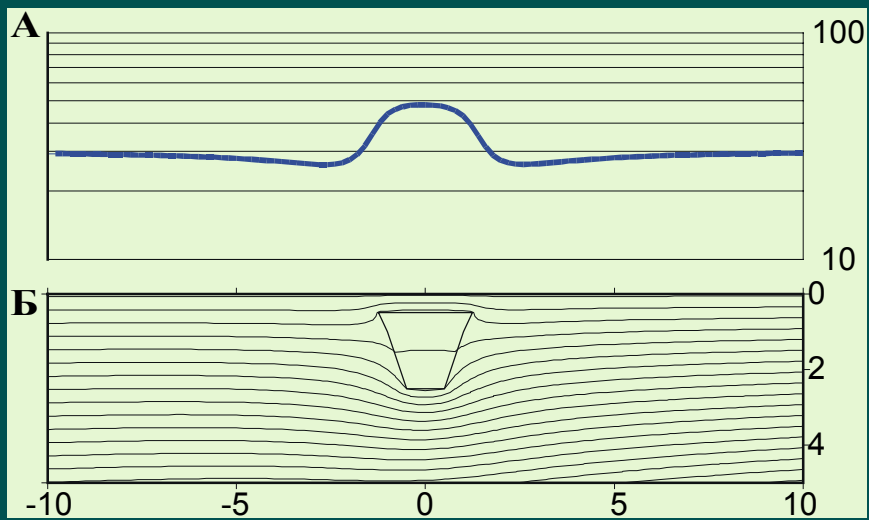
$$\frac{\partial \varphi_1}{\partial n} = \frac{\partial \varphi_2}{\partial n} = -\frac{\partial \psi_1}{\partial \tau} = -\frac{\partial \psi_2}{\partial \tau}.$$

$$\int_A^B \mathbf{j}(l) \cdot \mathbf{n}(l) dl = \int_A^B \frac{\partial \psi(l)}{\partial l} dl = -[\psi(B) - \psi(A)]$$

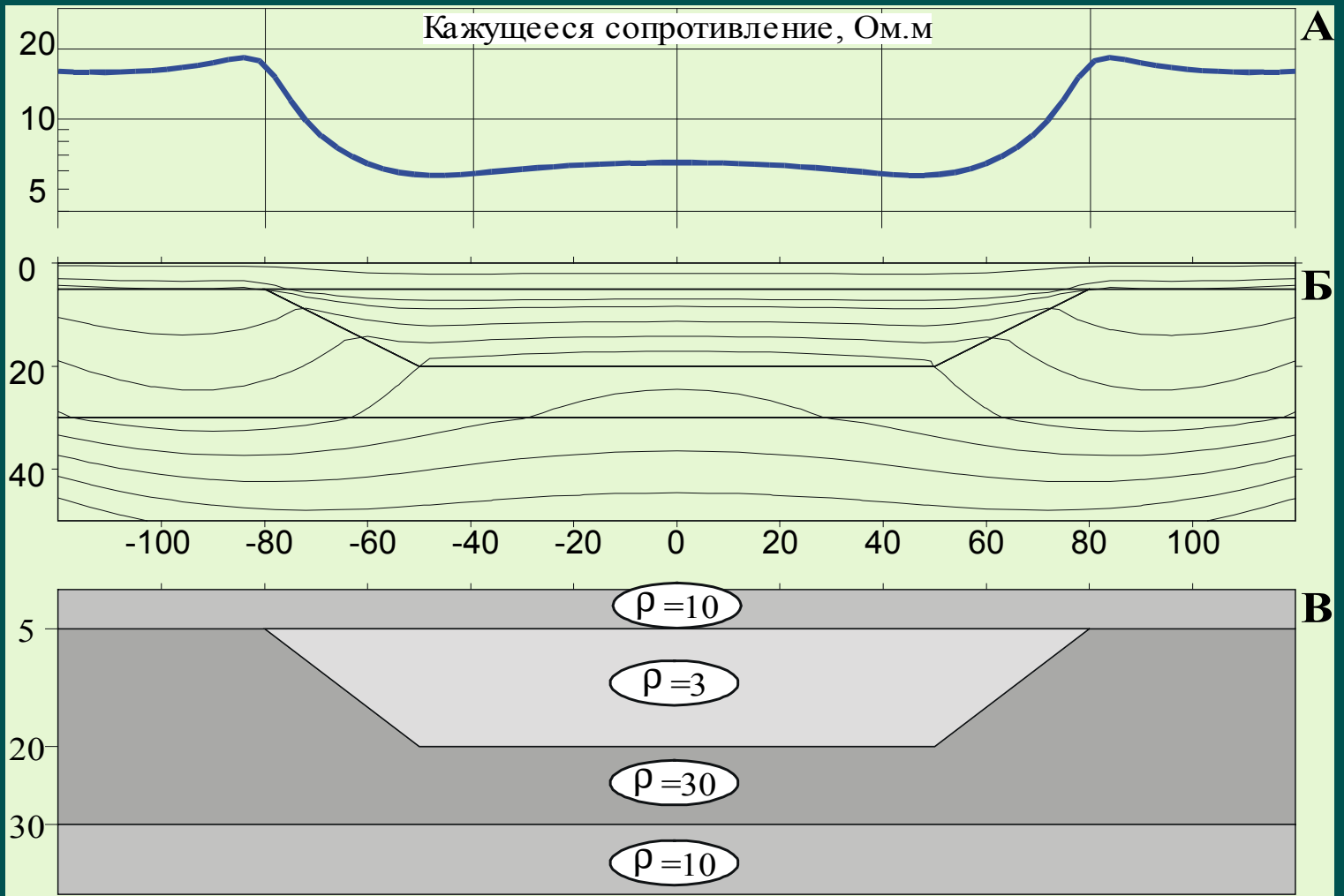
Неоднозначность функции тока

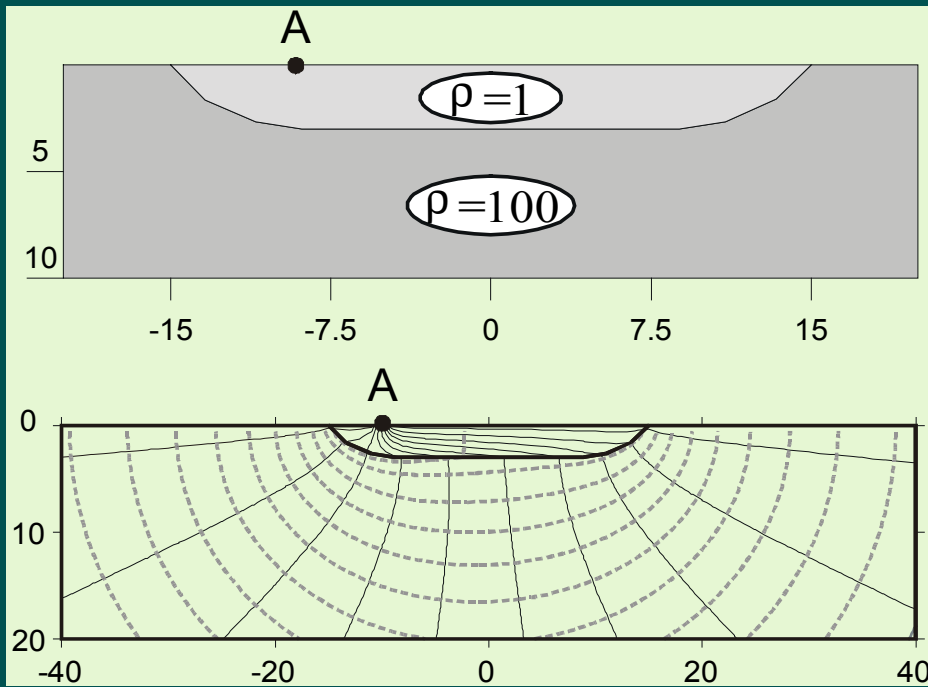


$$\int_A^B \mathbf{i}(l) \cdot \mathbf{n}(l) dl = -(\psi(B) - \psi(A)) = \begin{cases} I : \alpha I / 2\pi \\ II : (\alpha - 2\pi) I / 2\pi \\ III : (\alpha + 2\pi) I / 2\pi \end{cases}$$

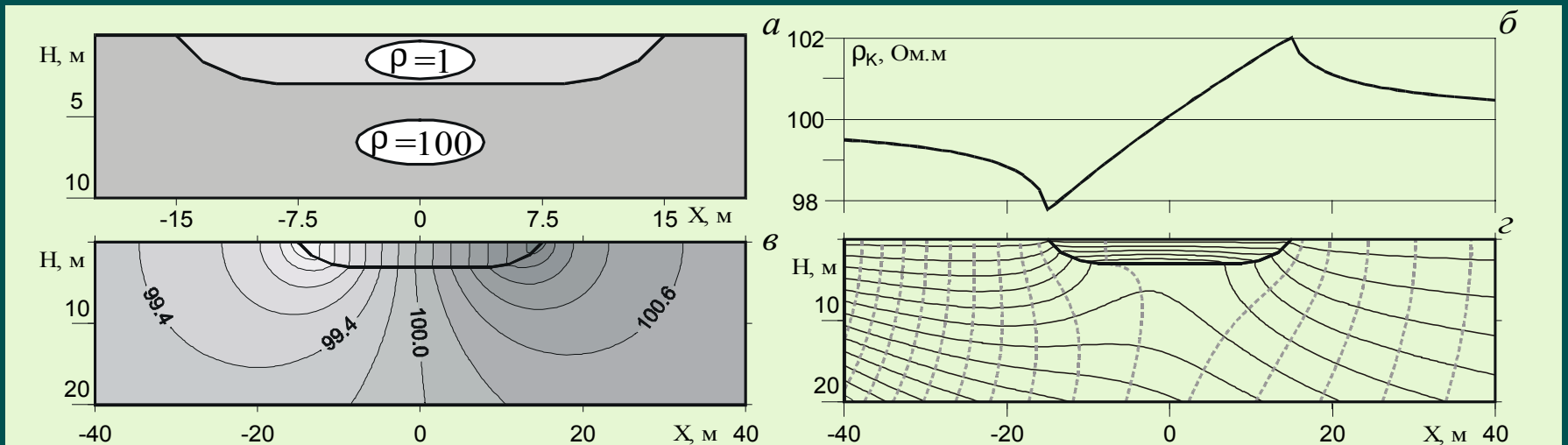


$$\rho_K = \rho_{MN} \frac{j_{MN}}{j_0}$$

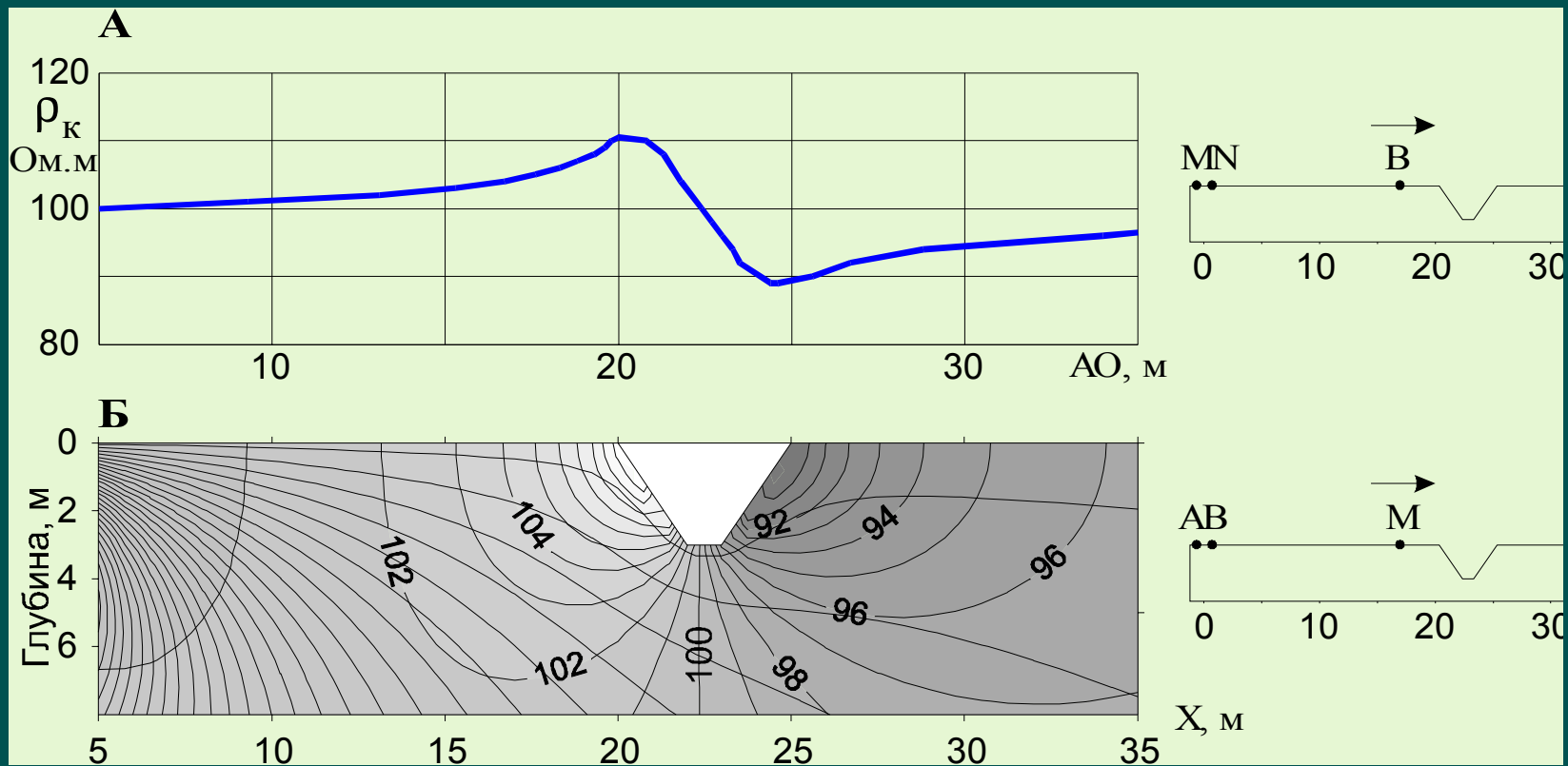




Искажение поля вблизи питающего электрода



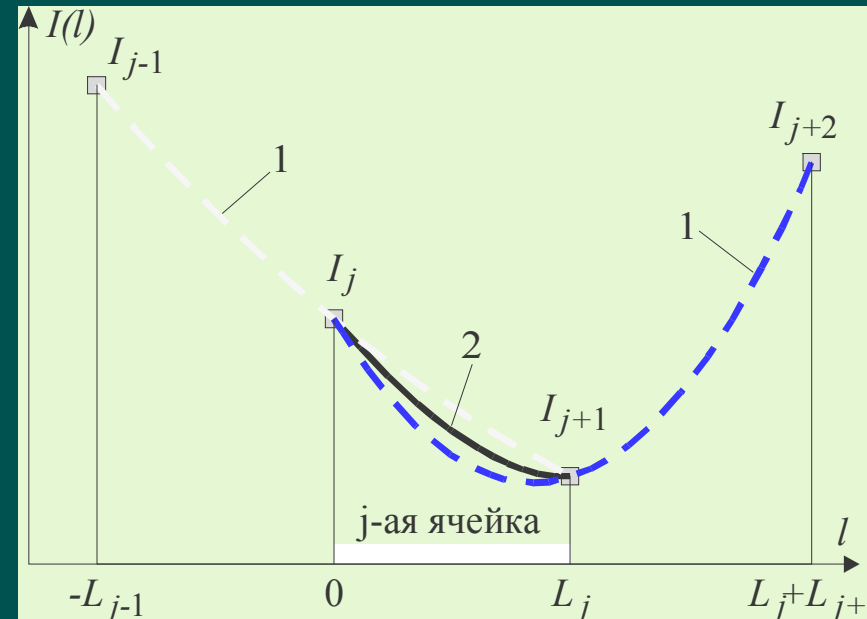
Потенциал-установка над проводящей неоднородностью: модель (а), кажущееся сопротивление (б), разрез кажущегося сопротивления $\gamma_k(x,H)$ (в), токовые линии и эквипотенциальные линии (г)



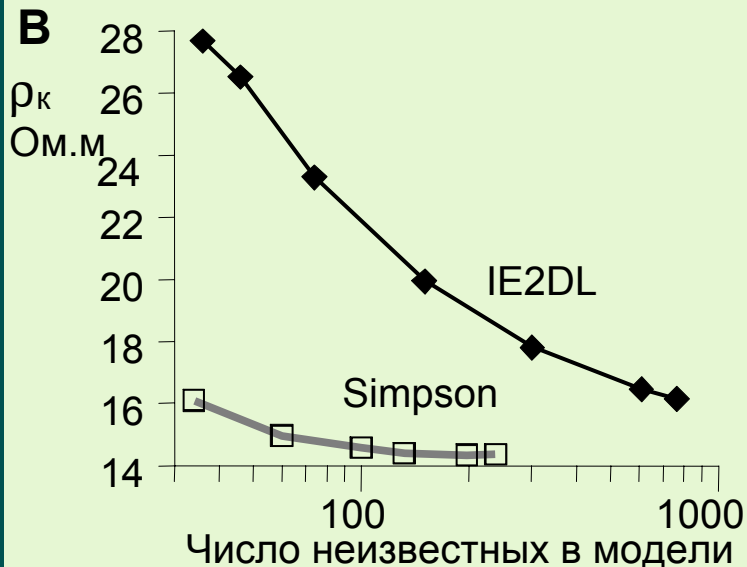
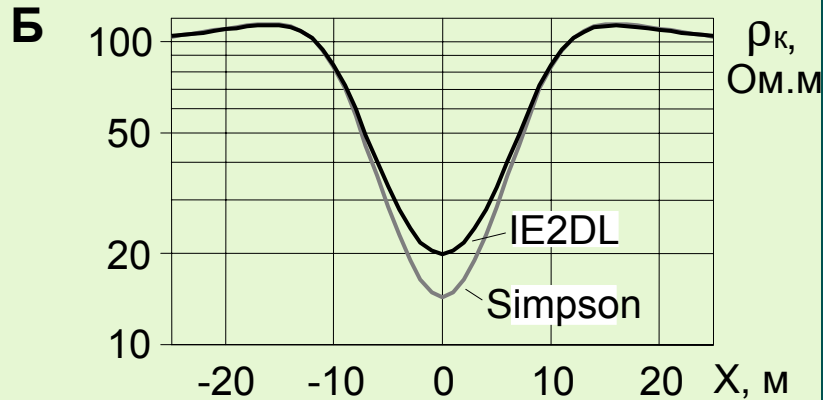
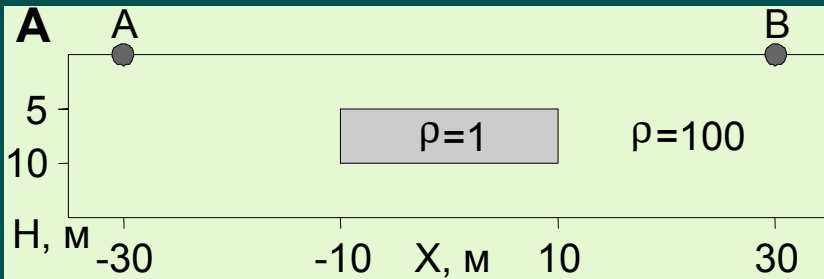
Квадратичная аппроксимация плотности вторичных зарядов

$$\begin{aligned} -\mathbf{n} \cdot \mathbf{E}_{ij}^S &= \int_{L_j} I(l) \frac{\partial G(l, m_i)}{\partial n} dl \approx \int_{L_j} F_j(l) \frac{\partial G(l, m_i)}{\partial n} dl = \\ &= \int_{L_j} I_j \cdot \frac{\partial G(l, m_i)}{\partial n} dl \approx I_j L_j \frac{\partial G(l_j, m_i)}{\partial n}, \end{aligned}$$

$$I(l) \approx F_j(l) = C_j^0 \cdot l^2 + C_j^1 \cdot l + C_j^2, \quad 0 \leq l \leq L_j$$

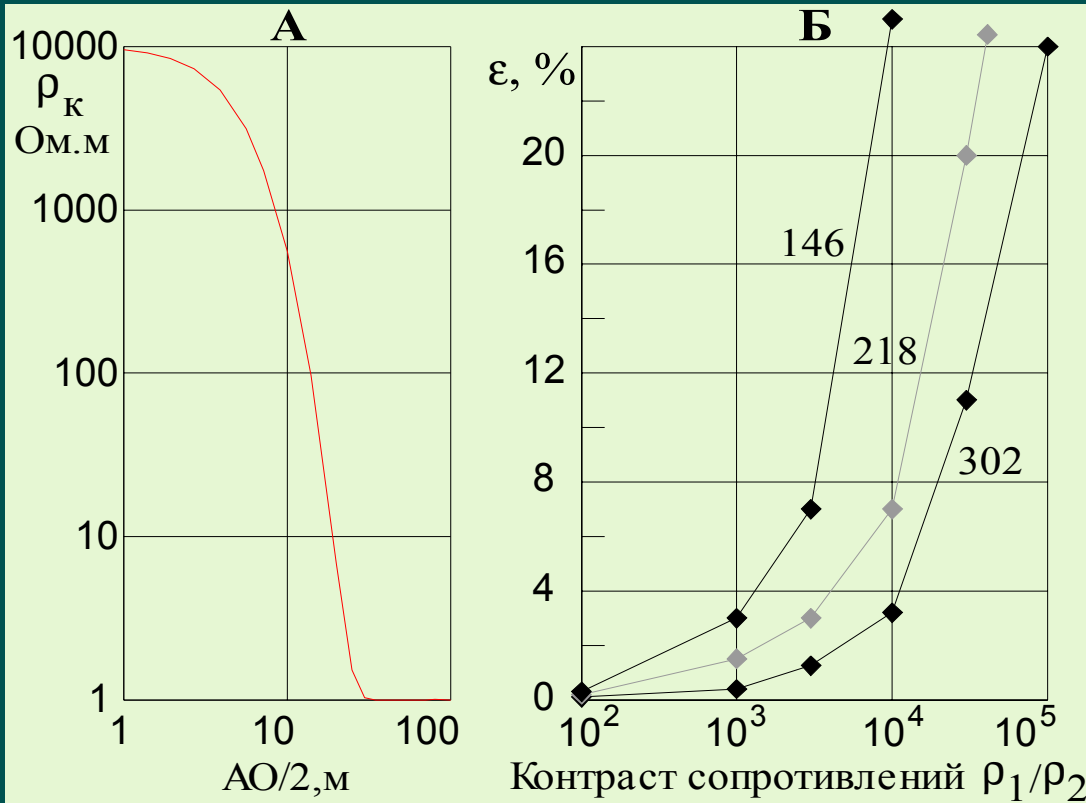


Пример 1



Тестовая модель (А), график ρ_k для установки СГ (Б) (число ячеек 150), зависимость ρ_k при $X=0$ от числа ячеек.

Пример 2



А. Кривая ВЭЗ для двухслойной модели ($h=3м$).

Б. Зависимость точности решения от контраста модели. Индекс графика - число ячеек в модели

Табличные интегралы

$$\int \frac{dx}{x^2 + z^2} = \frac{1}{z} \operatorname{arctg} \frac{x}{z}; \quad \int \frac{x dx}{x^2 + z^2} = \frac{1}{2} \ln(x^2 + z^2);$$

$$\int \frac{x^2 dx}{x^2 + z^2} = x - z \operatorname{arctg} \frac{x}{z}; \quad \int \frac{x^3 dx}{x^2 + z^2} = \frac{x^2 - z^2}{2} \ln(x^2 + z^2).$$

Глава 3. Электростатические искажения кривых ВЭЗ при бесконтактных методиках измерения

- §1. Аппаратура и методики для низкочастотной бесконтактной электроразведки
- §2. Кулоновская и индукционная составляющие переменного электрического поля
- §3. Поле емкостного электрода
- §4. Граничные условия для стационарного электрического поля на границе земля-воздух
- §5. Пример расчета поля в воздухе при наличии неоднородности
- §6. Особенности стационарного поля в воздухе от заземленного электрода с током

Кулоновская и индукционная составляющие переменного электрического поля

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = (\sigma - i\omega\epsilon\epsilon_0)\mathbf{E}$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = i\omega\mu\mathbf{H}$$

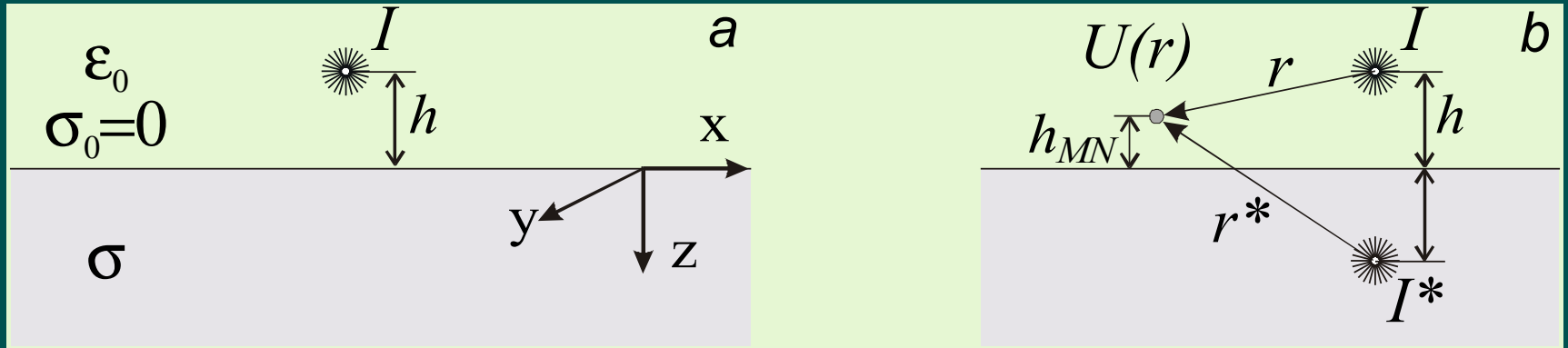
$$\mathbf{E} = i\omega\mu\mathbf{A} - \operatorname{grad} U$$

$$\mathbf{E}_{\text{инд}} = i\omega\mu\mathbf{A}$$

$$\mathbf{E}_{\text{кул}} = -\operatorname{grad} U$$

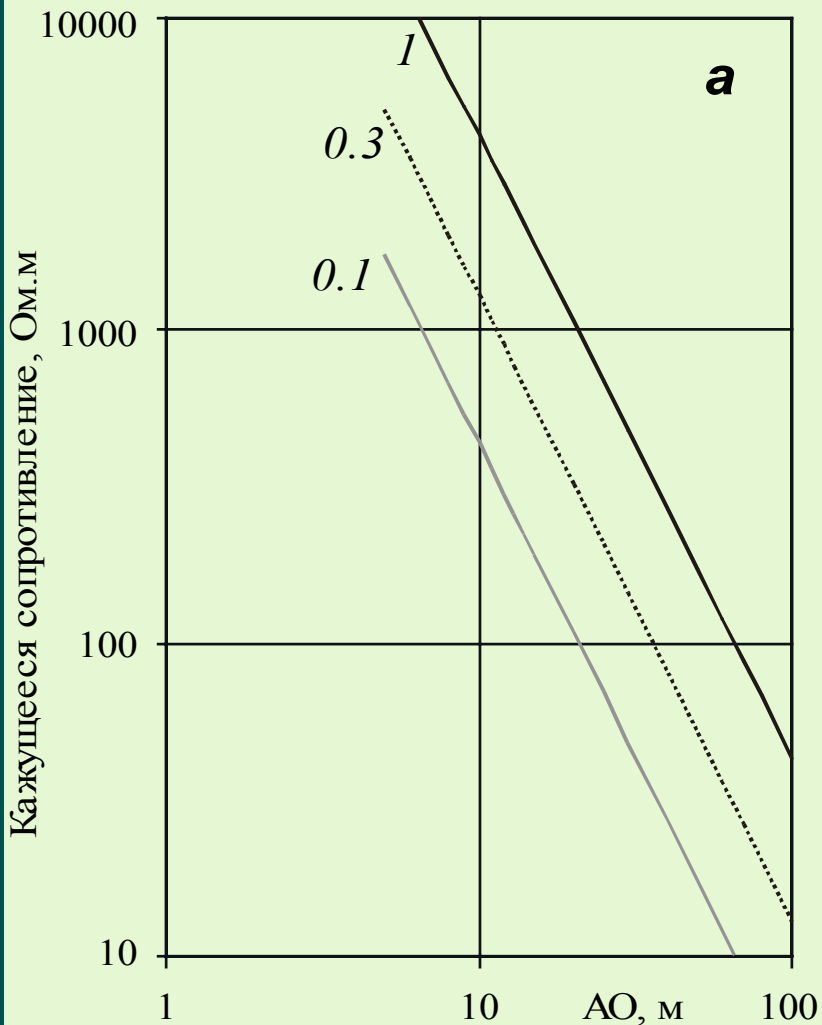
$$\operatorname{div}(\sigma - i\omega\epsilon\epsilon_0)\operatorname{grad} U = 0$$

Поле емкостного электрода



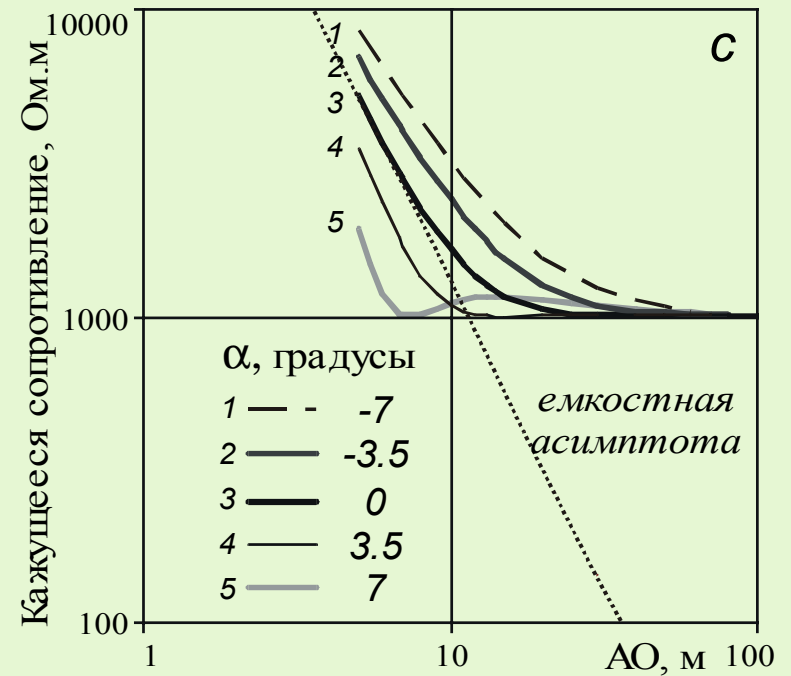
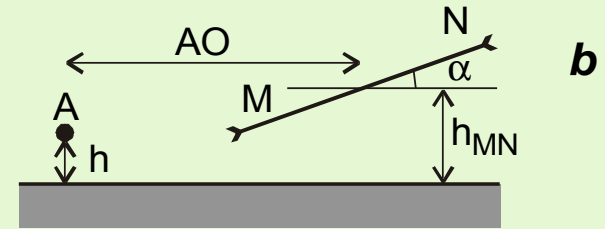
$$\begin{cases} U(r) = \frac{I}{i\omega\epsilon_0} \left(\frac{1}{4\pi r} + K_{12} \frac{1}{4\pi r^*} \right) \approx \frac{I}{2\pi r^* \sigma} + i \frac{I}{\omega\epsilon_0 4\pi} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r^*} \right), & z \leq 0, \\ U(r) = \frac{I}{i\omega\epsilon_0} \frac{1}{4\pi r} (1 + K_{12}) \approx \frac{I}{2\pi r \sigma}, & z \geq 0. \end{cases}$$

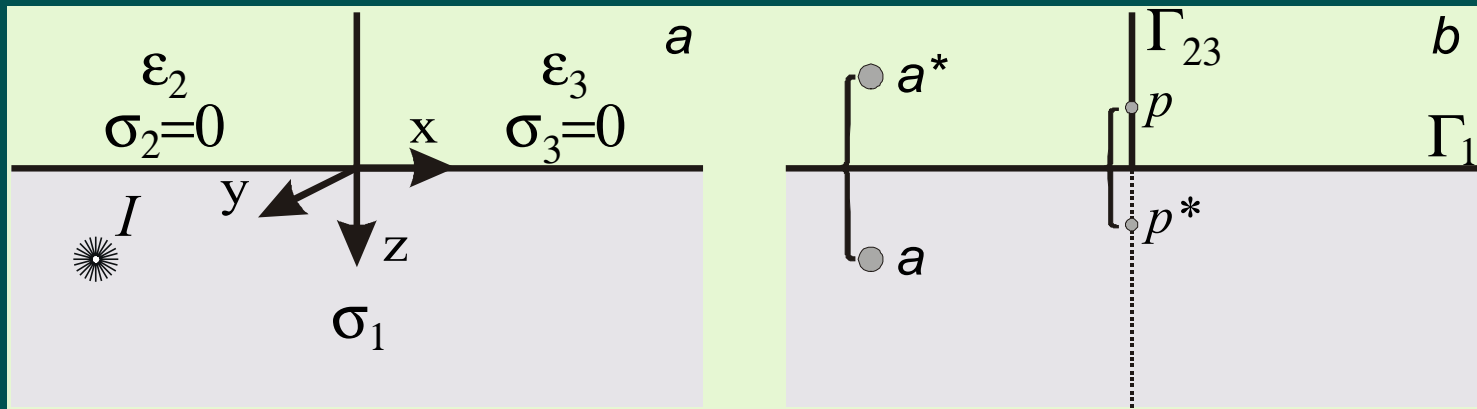
Емкостная асимптота (h=5мм)



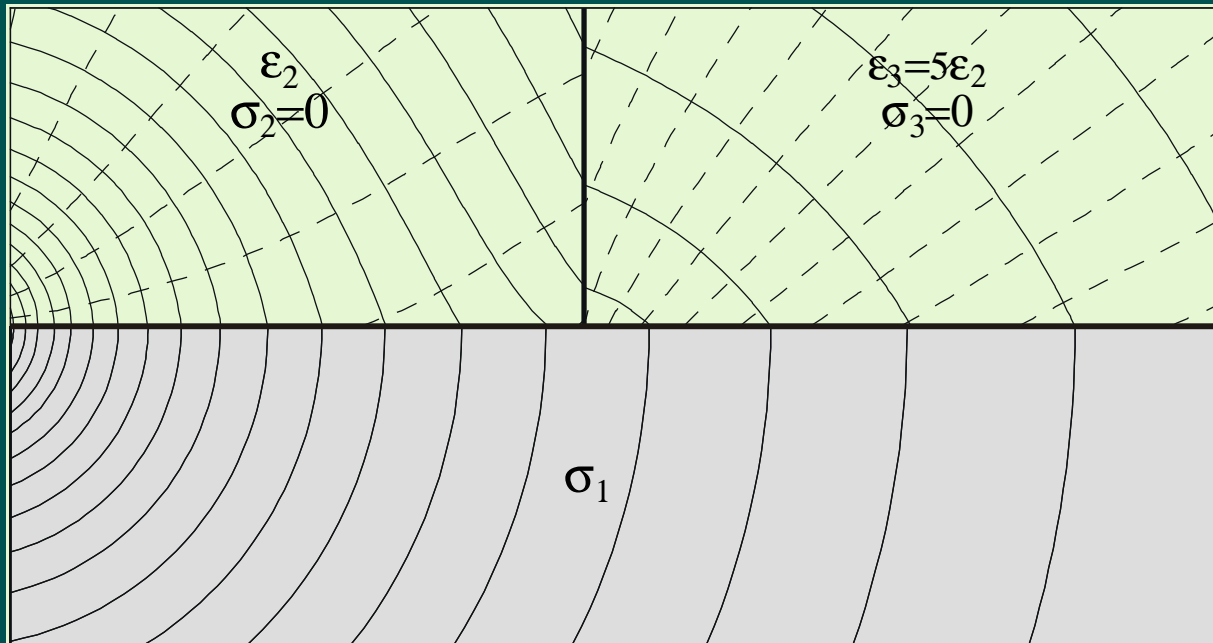
Кажущееся сопротивление при различных углах наклона антенны

$h_{MN}=0.3\text{ м}, \rho=1\text{ КОм}$

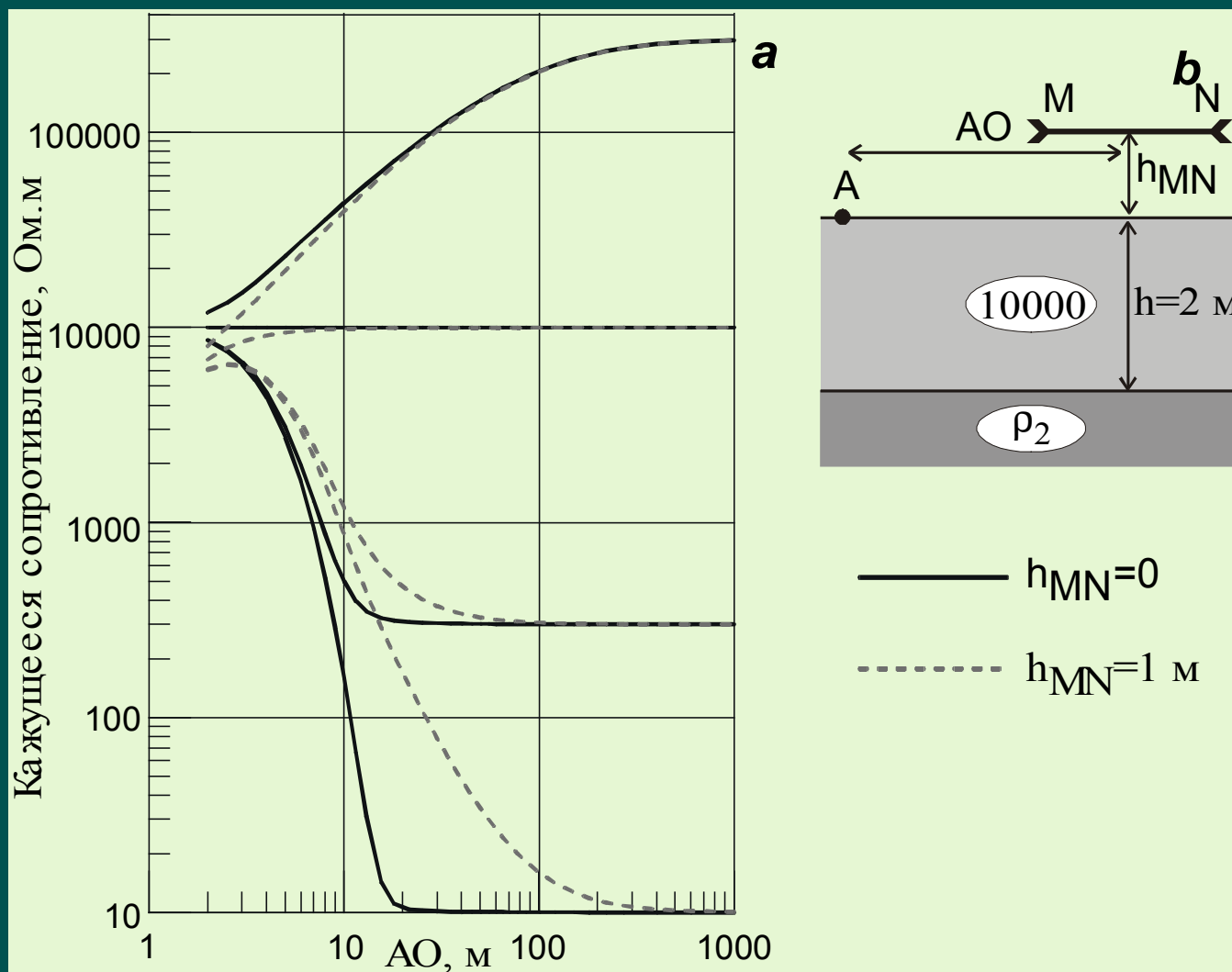


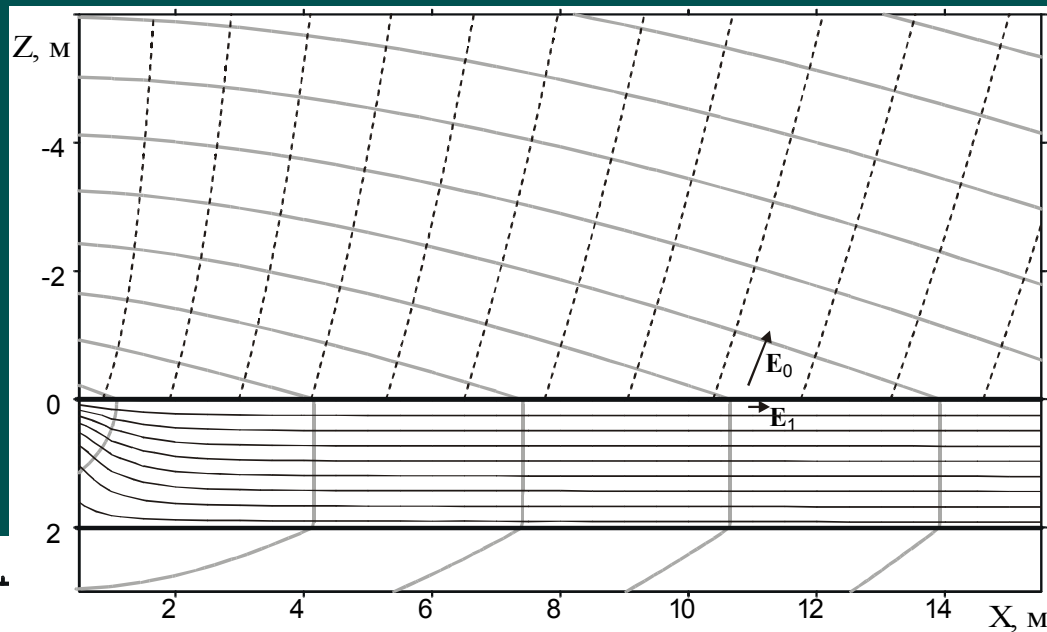
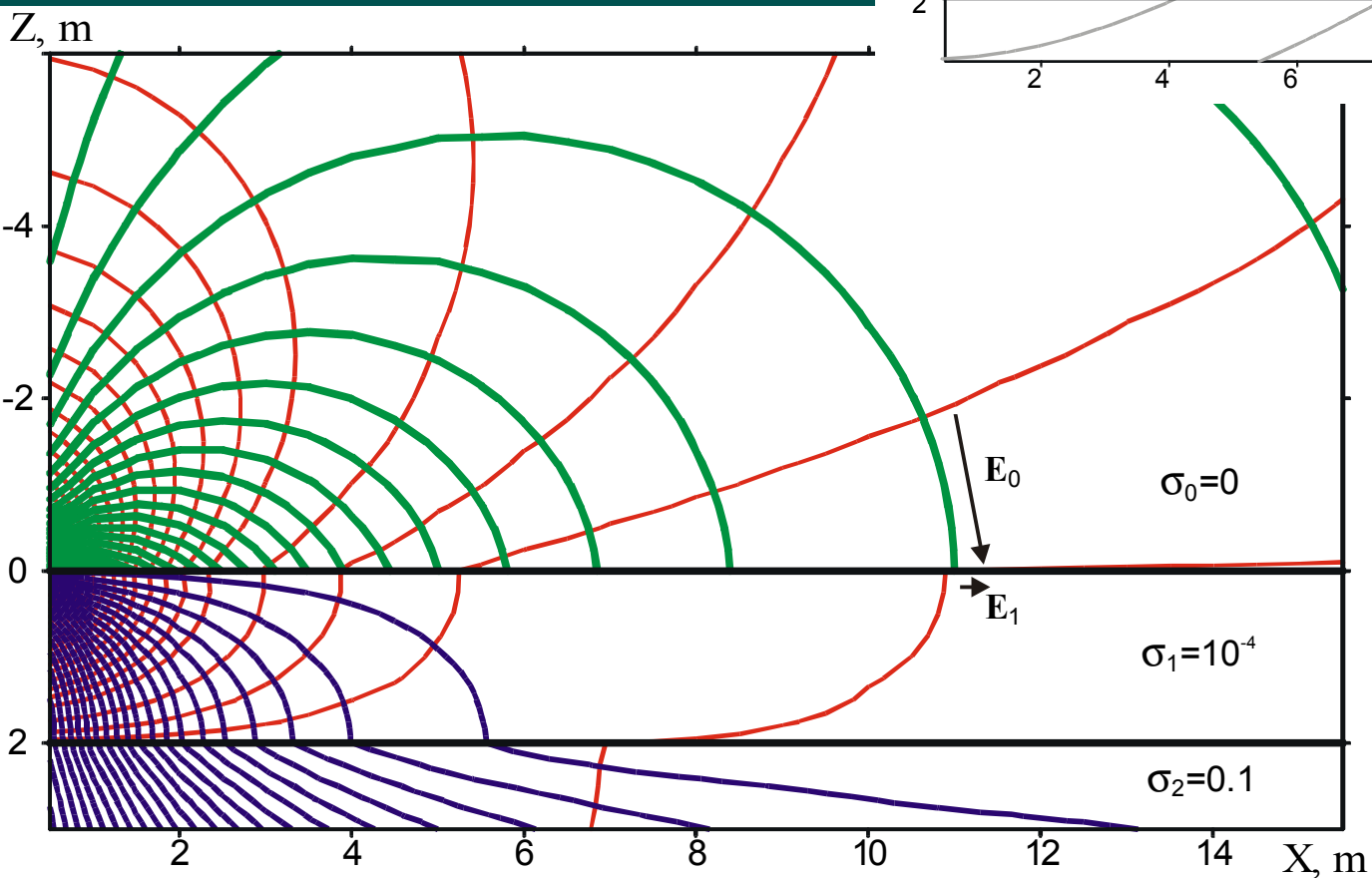


$$U_{23}(m) = \frac{2I}{\sigma_1} G(a, m) + \iint_{\Gamma_{23}} \frac{\Sigma(p)}{\epsilon_0} (G(p, m) - G(p^*, m)) dy_p dz_p$$

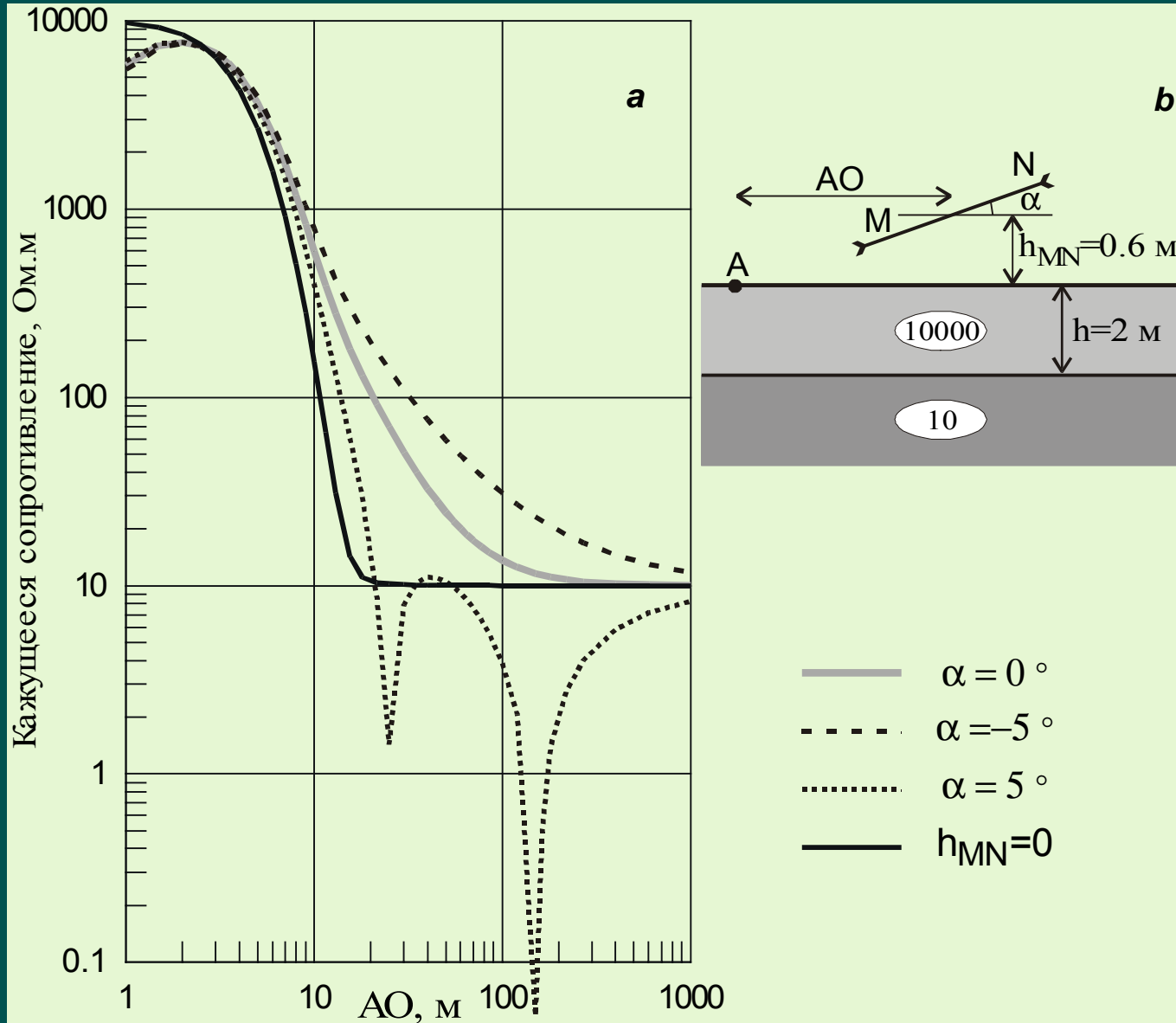


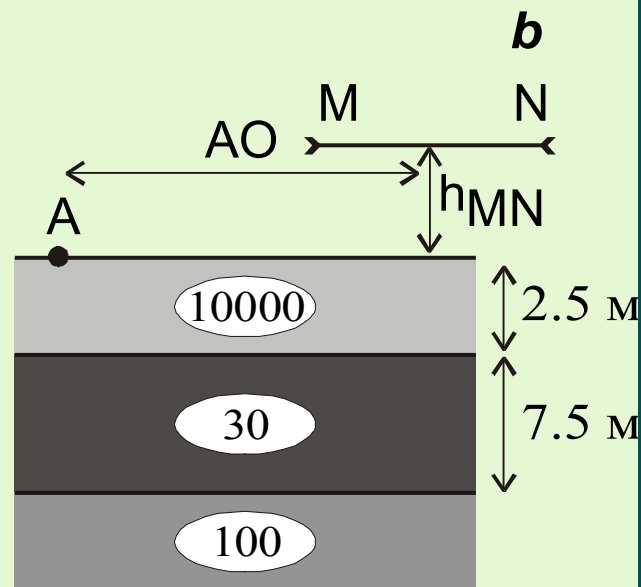
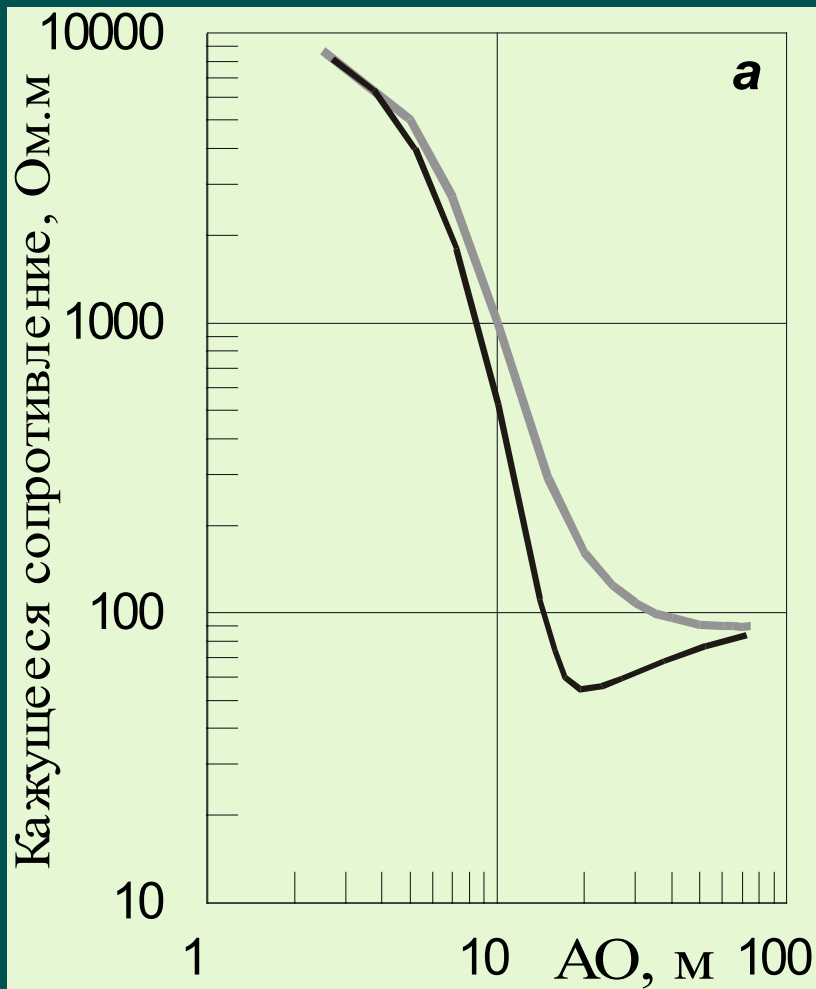
Зависимость электростатических искажений от типа разреза





Кажущееся сопротивление при различных углах наклона антенны





h_{MN} , метры

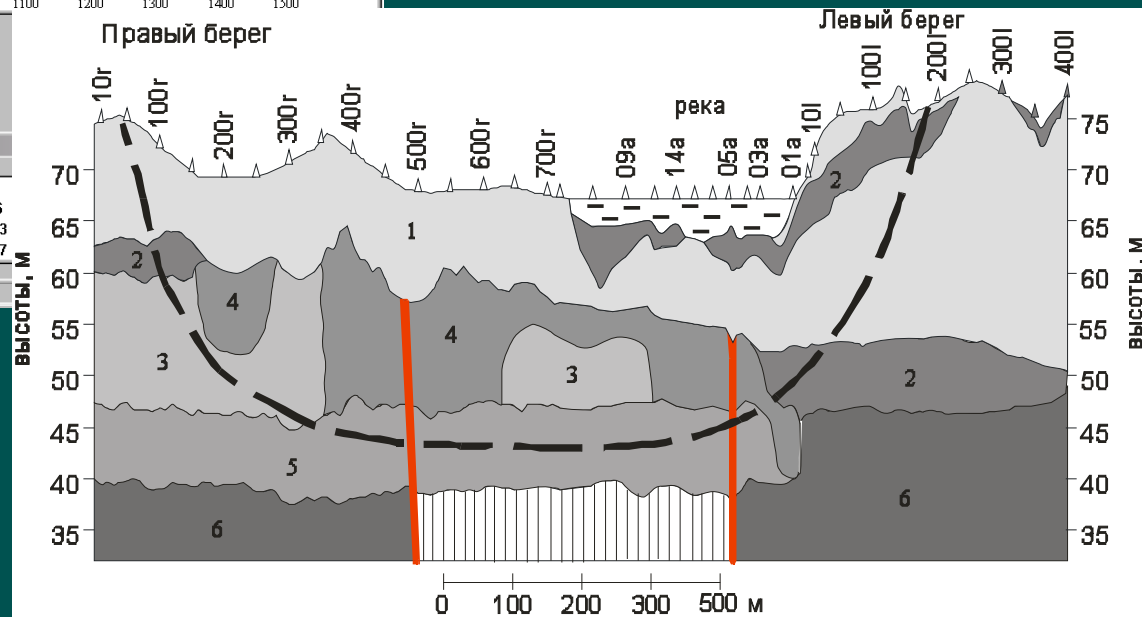
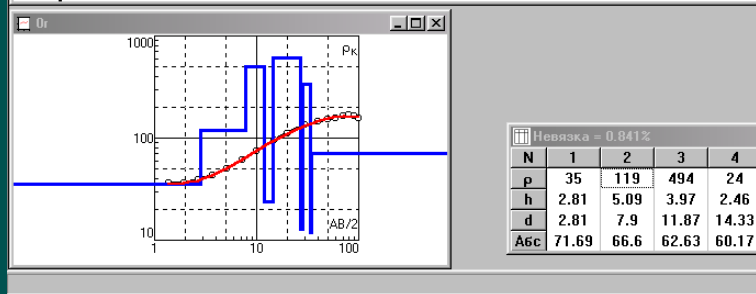
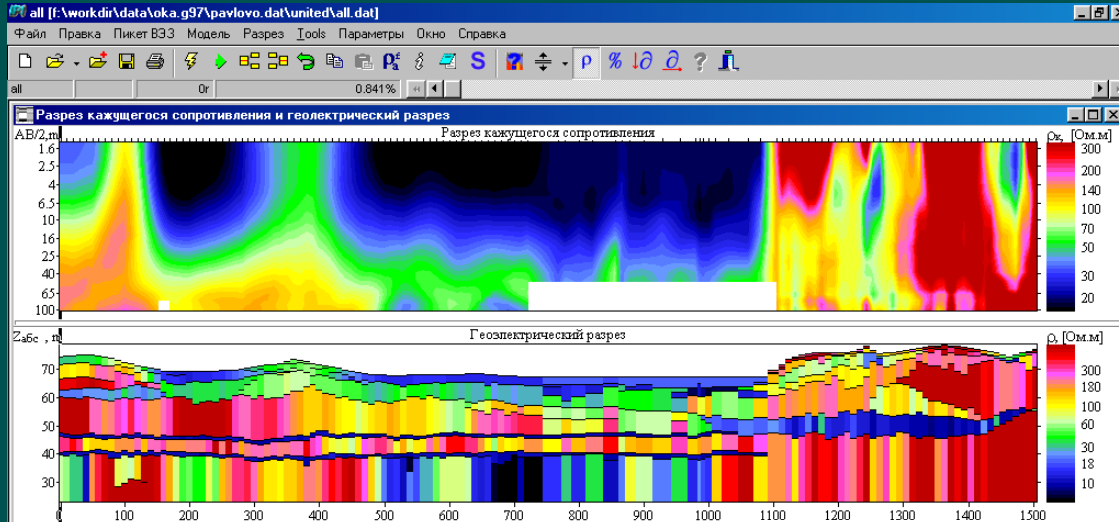
— 0.5

— 0

Глава 4. Примеры решения практических задач

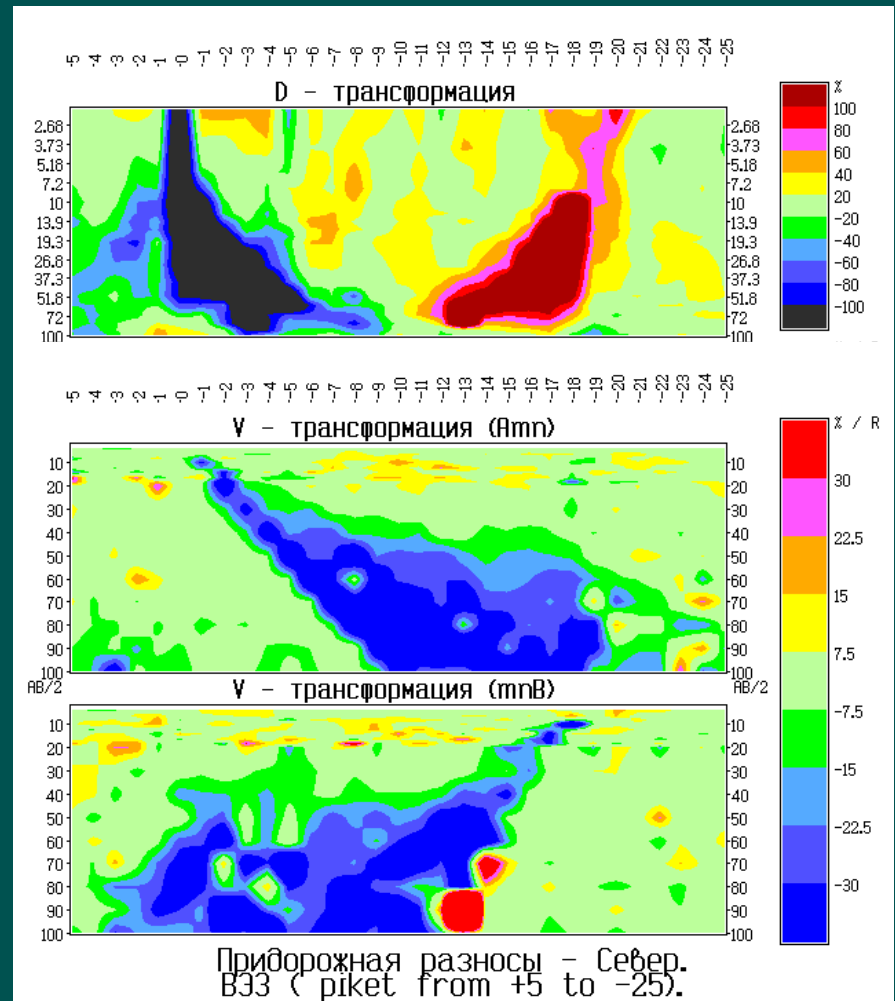
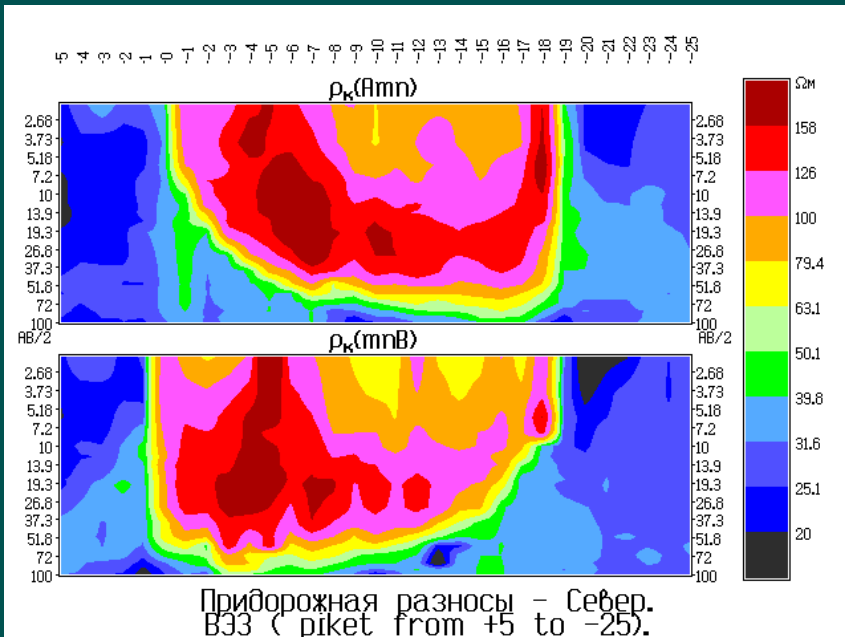
- §1. Пример одномерной интерпретации
- §2. Пример интерпретации двумерного разреза
- §3. Пример работ с использованием бесконтактного измерения электрического поля

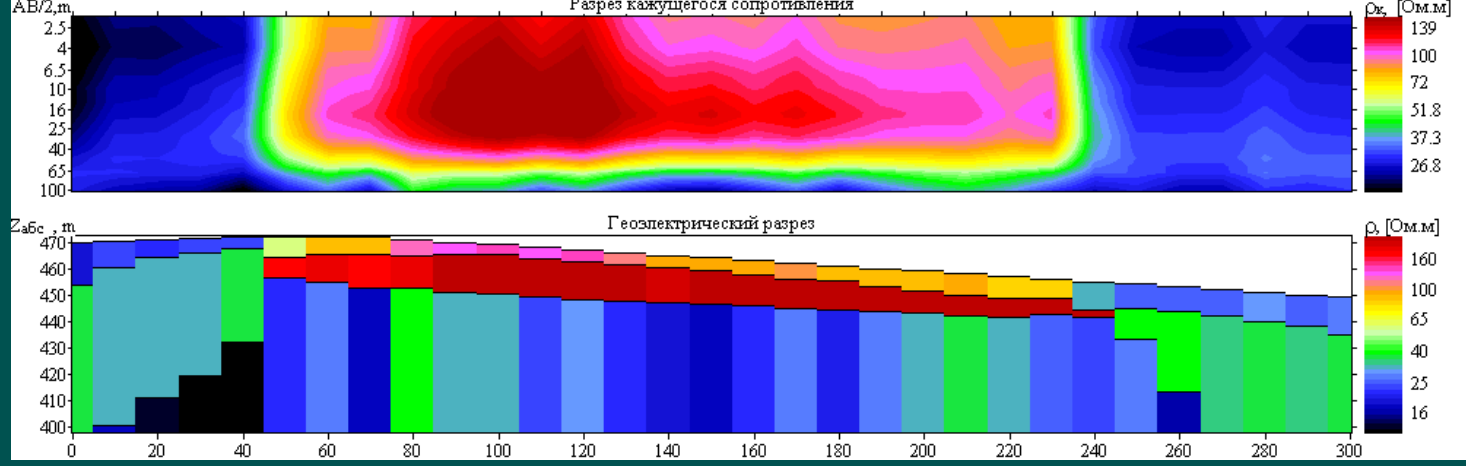
Пример одномерной интерпретации



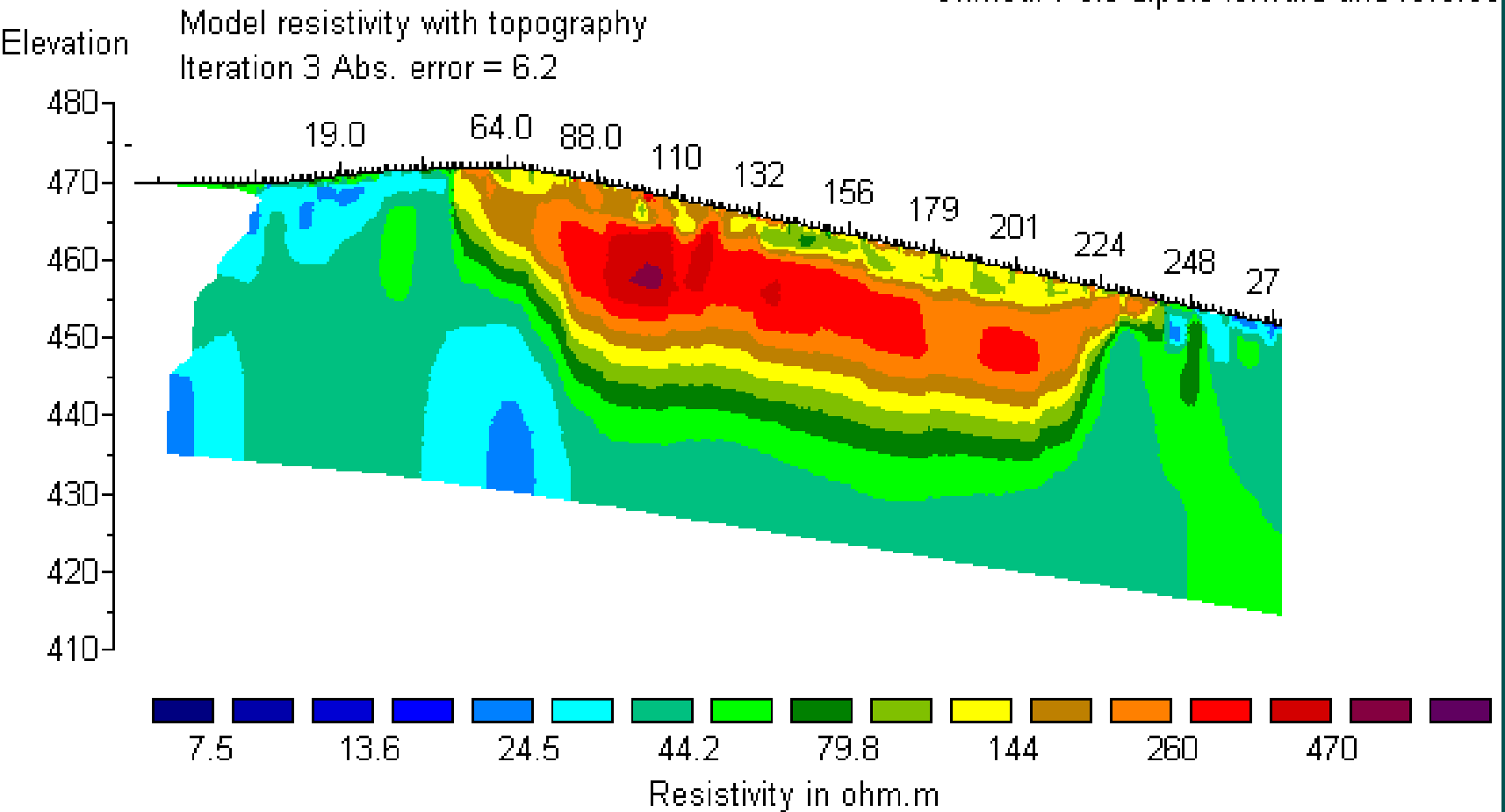
- | | | | | | | | |
|---|------------------|---|--------------------|---|-------------------|--|------------------------|
| 1 | Пески и супеси | 3 | Гипсы | 5 | Ангидриты | | Проводящие зоны |
| 2 | Глины и суглинки | 4 | Гипсы трещиноватые | 6 | Ангидриты и гипсы | | Работы |
| | | | | | | | Проектная трасса грубы |

Двумерная модель

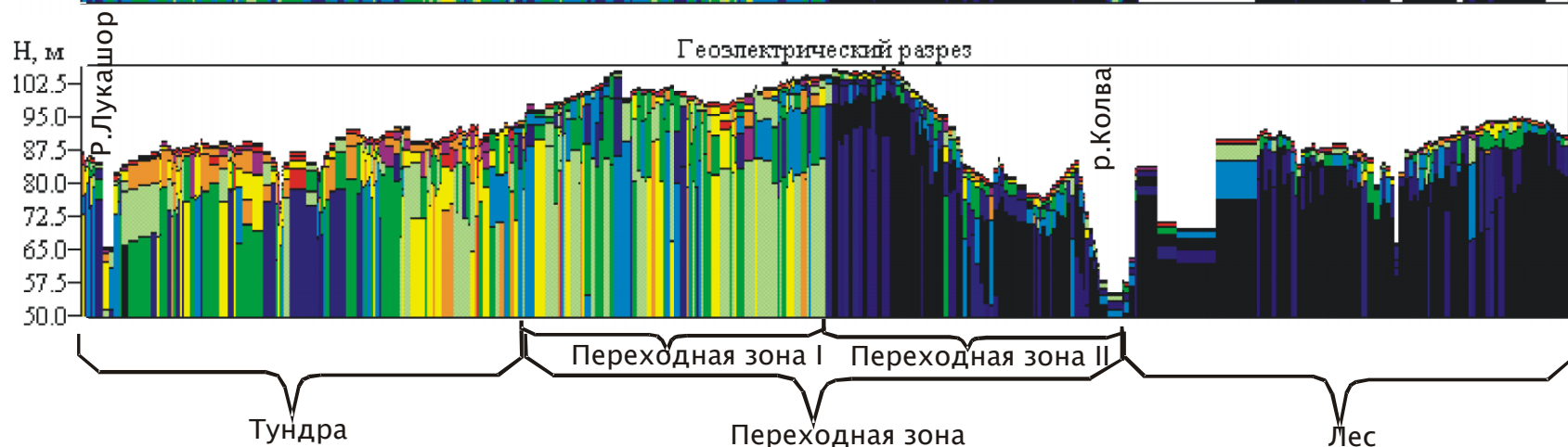
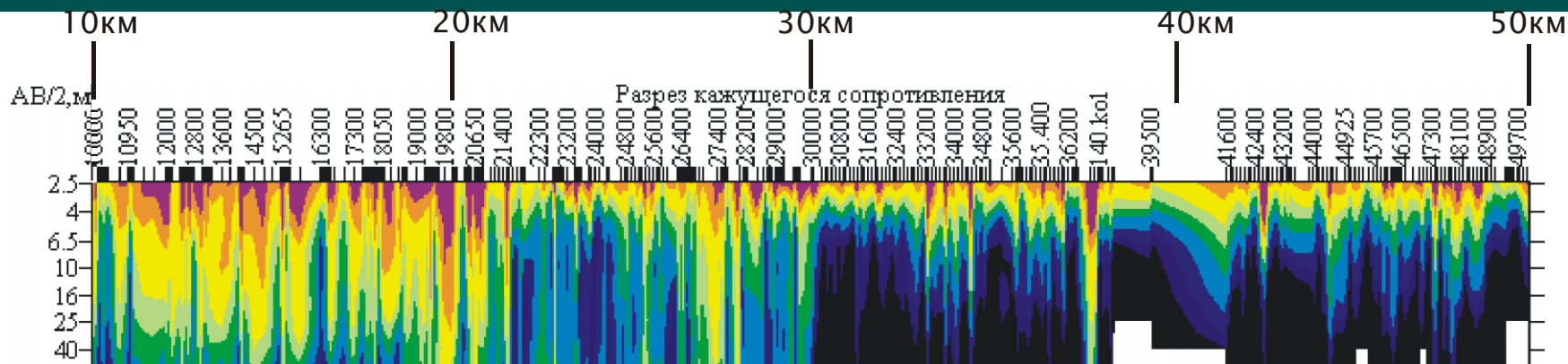




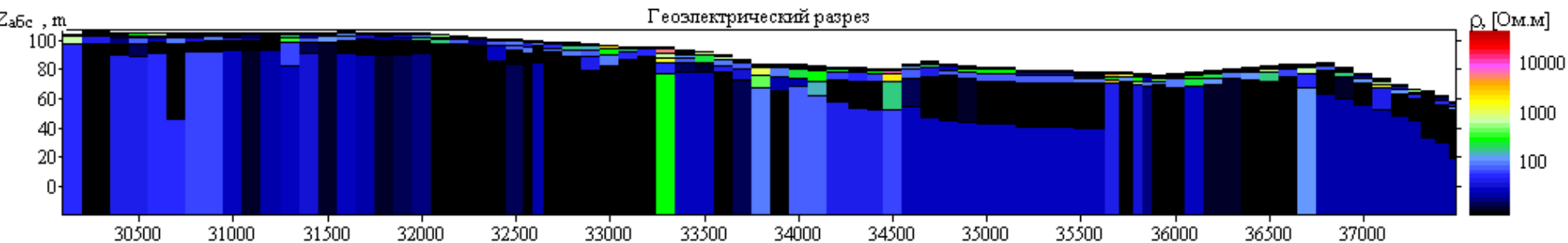
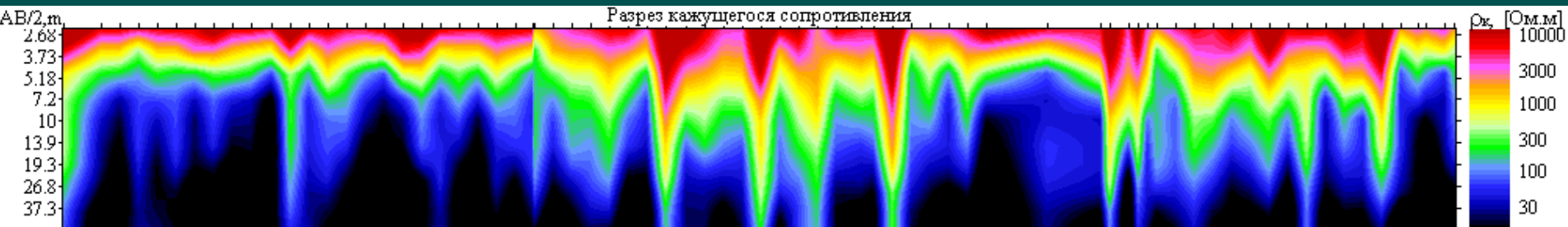
Crimea. Pole-dipole forward and reverse



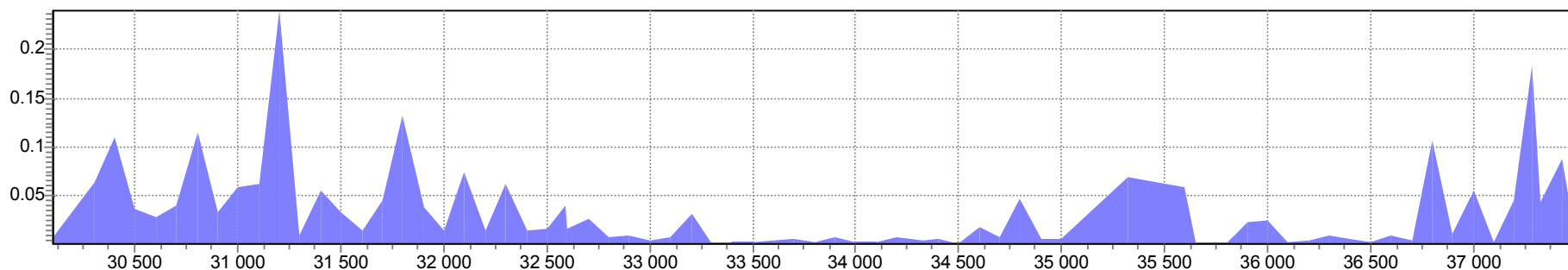
Результаты ВЭЗ на участке трассы “Харьяга-Уса” от 10 до 50 км

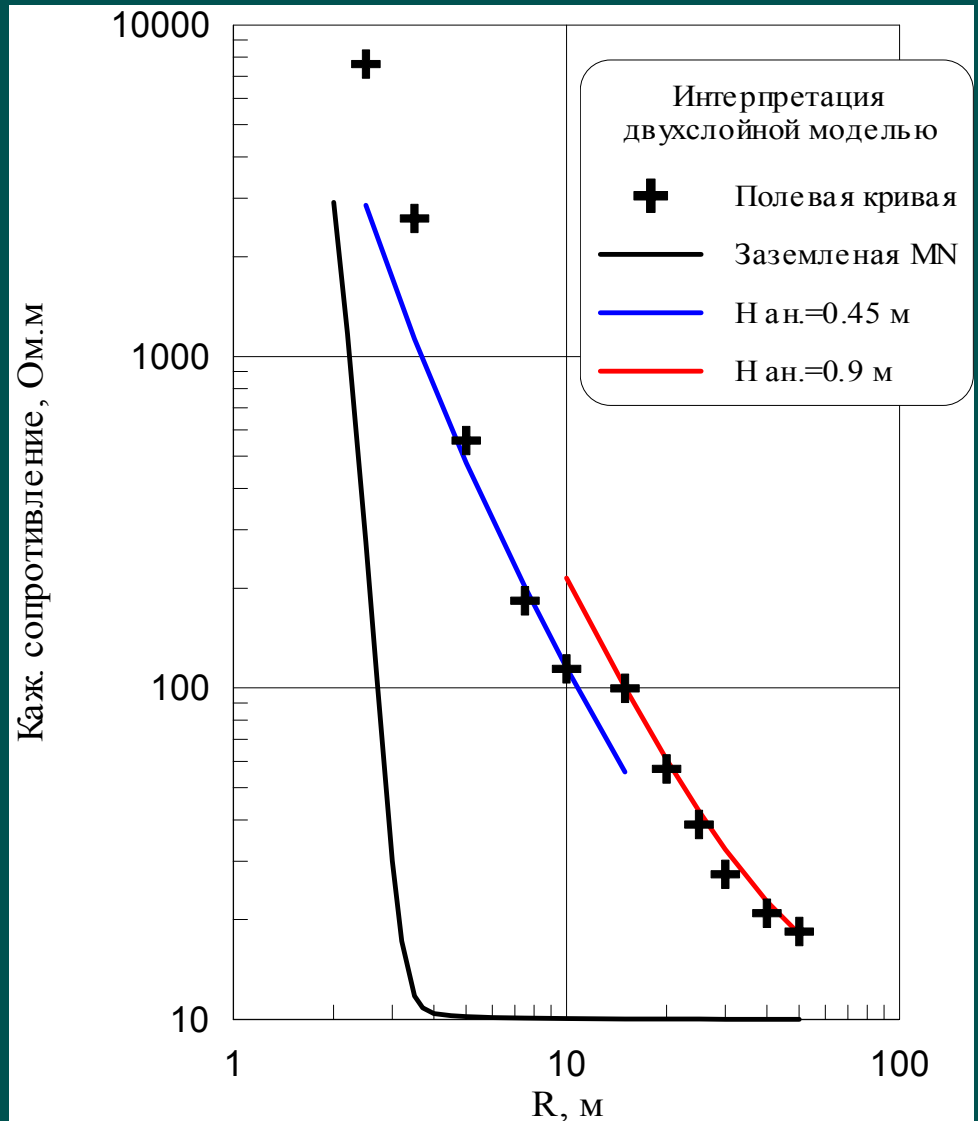
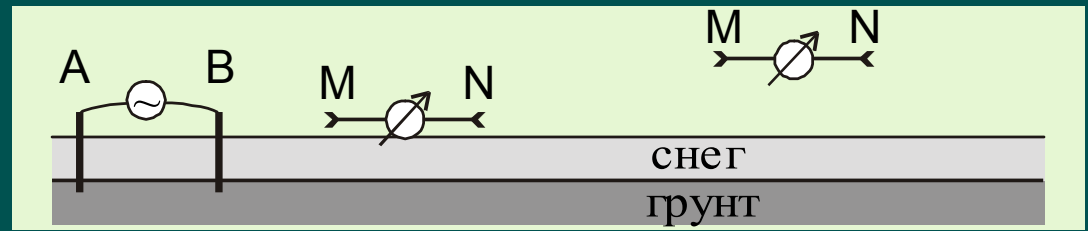
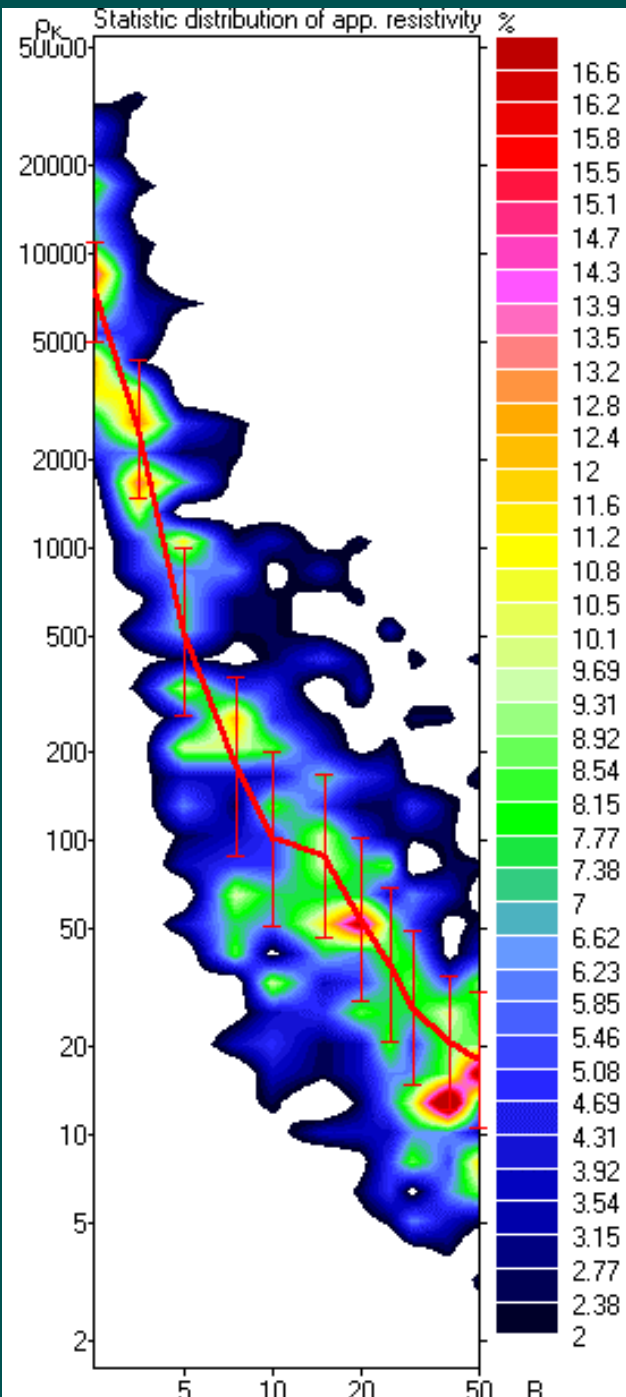


Второй переходный участок зоны между тундрой и лесом



Суммарная продольная проводимость до глубины 3 м (См)





Сопоставление интерпретации и данных бурения

● Первый слой

- $\rho = 15000 \text{ Ом.м}$
- $h = 0.25 \text{ м}$

● Второй слой

- $\rho = 10 \text{ Ом.м}$

● 0 – 0,2 м

мохо-растительный
слой

● 0,2 – 0,4 м: торф

● 0,4 – 6 м : глина

● 6 - ... м : суглинки