

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA**

**PATRICK ROGGER GARCIA**

**DESENVOLVIMENTO DE SOFTWARE LIVRE PARA PROCESSAMENTOS DE  
DADOS MAGNETOTELÚRICOS**

**Caçapava do Sul  
2018**



**PATRICK ROGGER GARCIA**

**DESENVOLVIMENTO DE SOFTWARE LIVRE PARA PROCESSAMENTOS DE  
DADOS MAGNETOTELÚRICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação)  
apresentado ao curso de Bacharelado em  
geofísica da Universidade Federal do Pampa  
como requisito parcial para obtenção do grau de  
Bacharel em geofísica.

Orientador: Vinicius Abreu de Oliveira

Co-orientadora: Andréa Cristina Lima dos San-  
tos Matos

**Caçapava do Sul  
2018**

G216d Garcia, Patrick Rogger

Desenvolvimento de Software livre para processamentos de dados magnetotélúricos / Patrick Rogger Garcia. – 2018.

31p. : il.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal do Pampa, GEOFÍSICA, 2018.

“Orientação: Vinicius Abreu de Oliveira; Coorientação: Andréa Cristina Lima dos Santos Matos”.

1. Magnetotélúrico. 2. Python3. 3. Software Livre. 4. Processamento Robusto. I. Título.

**PATRICK ROGGER GARCIA**

**DESENVOLVIMENTO DE SOFTWARE LIVRE PARA PROCESSAMENTOS DE  
DADOS MAGNETOTELÚRICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação)  
apresentado ao curso de Bacharelado em  
geofísica da Universidade Federal do Pampa  
como requisito parcial para obtenção do grau de  
Bacharel em geofísica.

Área de concentração: Geofísica Espacial,  
Geofísica de *Software*

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: XX de novembro de 2018.  
Banca Examinadora:

---

Prof. Post. Vinicius Abreu de Oliveira  
Orientador  
UNIPAMPA

---

Prof. Dr. Éverton Frigo  
UNIPAMPA

---

Titulo NOME  
INSTITUIÇÃO



## **RESUMO**

aqui fica o resumo

Palavras-chave: Magnetotelúrico. Python3. Software Livre. Processamento Robusto.





## **ABSTRACT**

This abstract

Keywords: Magnetotelluric. Python3. Free Software. Robust Processing.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Campo magnético natural e as contribuições das fontes do sinal MT. . . . .	16
Figura 2 – Gráfico do <i>skin-depth</i> em função da frequência [ $Hz$ ] . . . . .	19



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

GUI – *Graphical User Interface*<sup>1</sup>

MT – Magnetotelúrico

---

<sup>1</sup> Interface Gráfica do Utilizador



## LISTA DE SÍMBOLOS

$\sigma$	Condutividade Elétrica
$\rho$	Resistividade Elétrica
$\rho_a$	Resistividade Elétrica Aparente
$V$	Diferença de Potencial
$i$	Corrente Elétrica
$R$	Resistência Elétrica
$A$	Área
$L$	Comprimento
$\nabla \times$	Rotacional
$\nabla \cdot$	Divergente
$\vec{E}$	Campo Elétrico
$\vec{H}$	Campo Magnetizante
$\vec{B}$	Campo Magnético
$\vec{J}$	Densidade de Corrente
$\vec{D}$	Campo de Deslocamento Elétrico
$\varrho$	Densidade de Carga
$t$	Tempo
$\mu$	Permeabilidade Magnética
$\varepsilon$	Permissividade Elétrica
$i$	Unidade Imaginária





## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO . . . . .</b>	<b>11</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS . . . . .</b>	<b>13</b>
2.1	Objetivo Geral . . . . .	13
2.2	Objetivos Específicos . . . . .	13
<b>3</b>	<b>FUNDAMENTOS DO MÉTODO MAGNETOTELÚRICO . . . . .</b>	<b>15</b>
3.1	Resistividade Elétrica dos Materiais . . . . .	15
3.2	Origem das Correntes Telúricas . . . . .	15
3.2.1	Ressonâncias de Schumann . . . . .	16
3.2.2	Micropulsações . . . . .	16
3.2.3	Variações Diurnas . . . . .	16
3.3	Resposta do Método Magnetotelúrico . . . . .	16
3.4	Impedância Eletromagnética . . . . .	20
<b>4</b>	<b>AQUISIÇÃO DE DADOS E DEPENDÊNCIAS . . . . .</b>	<b>23</b>
4.1	Dependências e Processamento MT . . . . .	23
4.1.1	Aquisição de Dados MT . . . . .	23
4.1.2	Formatos de Arquivos de Dados MT . . . . .	23
4.1.3	Processamento Robusto – EMTF . . . . .	23
4.1.3.1	Mudança Tempo/Frequência Angular . . . . .	23
4.1.3.2	Função de Transferências . . . . .	23
4.1.4	Pacotes de Processamento do Grupo Geoma – INPE . . . . .	23
<b>5</b>	<b>DESENVOLVIMENTO E ARQUITETURA DO PAMPAMT . . . . .</b>	<b>25</b>
<b>6</b>	<b>RESULTADOS E APLICAÇÃO DO PAMPAMT . . . . .</b>	<b>27</b>
6.1	Aplicação do PampaMT . . . . .	27
6.1.1	Área de Estudo . . . . .	27
6.1.2	Contexto Geológico . . . . .	27
6.1.3	Processamento dos Dados . . . . .	27
6.1.4	Resultados e Interpretação Geofísica . . . . .	27
<b>7</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS . . . . .</b>	<b>29</b>
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>31</b>



## 1 INTRODUÇÃO

A interação do vento solar com a magnetosfera terrestre, gera correntes elétricas na alta atmosfera. Essas correntes são chamadas de correntes telúricas, onde essas penetram e propagam-se por todo o interior da Terra. A indução gerada pela propagação das correntes telúricas forma o sinal analítico do método geofísico magnetotelúrico (MT) (PARKINSON, 1983). As aplicações do MT giram em torno da prospecção de petróleo e estudos crustais. A aplicação justifica-se pela profundidade de investigação do método, que varia de 100 metros a 200 quilômetros.

No entanto, devido a complexidade do método tem-se um desestímulo ao desenvolvimento de *softwares*, o que produz um ambiente onde programas proprietários agregam um alto valor comercial, muitas vezes inviabilizando o uso acadêmico. E ainda, os programas de uso livre não são amigáveis com o usuário. De fato, o seu uso se dá, unicamente, por linhas de comando que não é familiar para a maioria dos potenciais usuários do MT.

A comunidade MTnet (MTNET, 2018), mantém laços com diversos pesquisadores na área do MT, e reúne as aplicações destinadas aos processamentos, tais como: *softwares* de pré-processamento, inversão, tratamento estatísticos, dentre outros. Os programas alocados no MTnet são de uso livre e destinados a comunidade acadêmica.

A proposta deste trabalho visa unir os programas livres em uma única plataforma. Essa será construída para ser amigável, fazendo uso de uma GUI (*Graphical User Interface*<sup>1</sup>) simples, agindo como intermediária entre o usuário e os programas disponíveis no MTnet.

---

<sup>1</sup> Interface Gráfica do Utilizador



## 2 OBJETIVOS

### 2.1 Objetivo Geral

Este trabalho se destina ao desenvolvimento de um *software* livre, com o objetivo de integrar e facilitar o processamento de dados MT.

### 2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos compreendem os seguintes itens:

- Criar novos algoritmos escritos em *Python*, tanto para a GUI quanto para otimizar o tempo de processamento dos dados;
- Atualizar os algoritmos já existentes usando as novas tecnologias;
- Obter um perfil lito-geofísico utilizando apenas as ferramentas aqui desenvolvidas;
- Comparar os resultados obtidos com trabalhos já consolidados<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> procurar alguns trabalhos na area



### 3 FUNDAMENTOS DO MÉTODO MAGNETOTELÚRICO

Proposto com (TIKHONOV, 1950) e (CAGNIARD, 1953) o método magnetotelúrico usa as fontes passivas<sup>1</sup> eletromagnéticas do planeta Terra para estudar e mapear a subsuperfície.

Nesta secção será mostrado sucintamente a origem do sinal MT. Antes de demonstrar as bases teóricas do método, será mostrado brevemente sobre a resistividade elétrica, sendo esse o elemento fundamental para as interpretações lito-geofísicas com base no magnetotelúrico.

#### 3.1 Resistividade Elétrica dos Materiais

O método MT usa a resistividade elétrica ( $\rho$  [ $\Omega m$ ]) ou o seu inverso, a condutividade elétrica ( $\sigma$  [ $S$ ]), para distinguir e estudar a distribuição dos elementos geológicos em subsuperfície.

A resistividade elétrica é um parâmetro físico intrínseco a cada material. Ela relaciona a dificuldade da passagem de corrente (independente do modelo nas dimensões do material estudado.) a cada material, sendo sempre constante<sup>2</sup>.

Georg Ohm em 1827 verificou de forma empírica que ao aplicar uma diferença de potencial ( $\Delta U$  [ $V$ ]) em um material, esse exerce uma resistência a passagem e corrente ( $i$  [ $A$ ]). Materiais que obedecem a seguinte Lei de Ohm (equação 3.1) são chamados de materiais ôhmicos.

$$\Delta U = Ri \quad (3.1)$$

Escrever de novo, ta muito ruim kkkkkk

#### 3.2 Origem das Correntes Telúricas

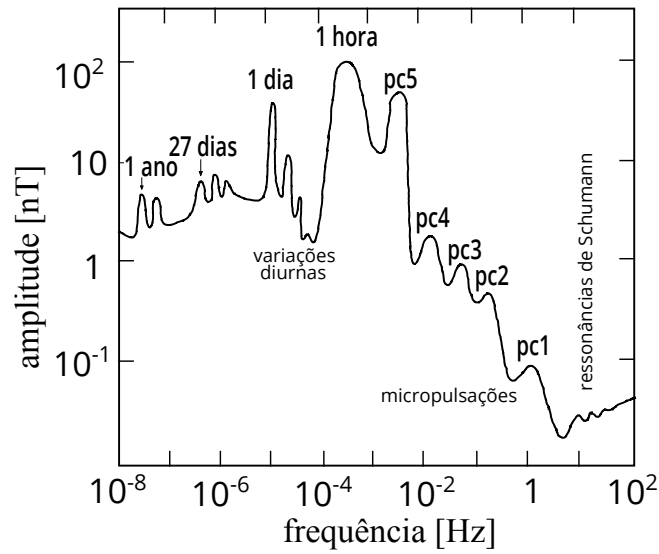
O método MT utiliza-se de um amplo espectro de campo natural terrestre ( $10^{-4}$  a  $10^4$   $Hz$ ) para as sondagens geofísicas. Essa característica permite que a sondagem magnetotelúrica alcance centenas de quilômetros.

O sinal MT tem sua origem nas ressonâncias de Schumann, nas micropulsações e nas variações diurnas (PÁDUA, 2004). A figura 1 mostra a contribuição de cada mecanismo no espectro MT.

<sup>1</sup> Fontes passivas – São fontes de sinal que não dependem de instrumentos artificiais para gerá-la.

<sup>2</sup> Para os materiais geológicos a resistividade é representada por um intervalo de valores, devido as complexidades químicas e físicas das diferentes litologias.

Figura 1 – Campo magnético natural e as contribuições das fontes do sinal MT.



Fonte: (PÁDUA, 2004).

### 3.2.1 Ressonâncias de Schumann

escrever sobre as ressanancias brevemente

### 3.2.2 Micropulsações

### 3.2.3 Variações Diurnas

## 3.3 Resposta do Método Magnetotelúrico

O magnetotelúrico assim como os outros método geofísicos eletromagnéticos, fundamentam-se nas Leis de Maxwell [3.2 – 3.5].

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (3.2)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (3.3)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (3.4)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (3.5)$$

Onde,



- $\vec{E}$  → Campo Elétrico [V/m]  
 $\vec{B}$  → Campo Magnético [T]  
 $\vec{H}$  → Campo Magnetizante [A/m]  
 $\vec{J}$  → Densidade de Corrente [A/m<sup>2</sup>]  
 $\vec{D}$  → Campo de Deslocamento Elétrico [C/m<sup>2</sup>]  
 $\varrho$  → Densidade de Carga [C/m<sup>3</sup>]  
 $t$  → Tempo [s]

Para os estudos magnetotelúricos são feitas as seguintes afirmações, que auxiliam e simplificam o desenvolvimento:

A Terra comportasse como um condutor ôhmico e um semi-espaço isotrópico.

Podemos utilizar, partindo dessas características e atrelado a um campo eletromagnético pouco intenso as seguintes relações constitutivas:

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (3.6)$$

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} \quad (3.7)$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (3.8)$$

- $\mu$  → Permeabilidade Magnética [H/m]  
 $\varepsilon$  → Permissividade Elétrica [F/m]  
 $\sigma$  → Condutividade Elétrica [S/m]

Cada coeficiente das relações constitutivas funcionam como tensores, variantes no tempo, para meios anisotrópicos. Para o estudo abordado e seguindo a afirmação, onde a Terra tornasse um meio isotrópico, isso implica que os tensores,  $\mu$  e  $\varepsilon$  são estáticos e assumem os seguintes valores:

$$\begin{aligned} \mu &= 1,2566 \times 10^{-6} \text{ H/m} \\ \varepsilon &= 8,85 \times 10^{-12} \text{ F/m} \end{aligned}$$

Utilizando as equações constitutivas podemos reescrever as equações 3.2 e 3.3:

$$\begin{aligned} \nabla \times \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}; & \vec{B} &= \mu \vec{H} \\ \nabla \times \vec{E} &= -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \end{aligned} \quad (3.9)$$

$$\begin{aligned}\nabla \times \vec{H} &= \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}; & \vec{J} &= \sigma \vec{E} \quad \text{e} \quad \vec{D} = \epsilon \vec{E} \\ \nabla \times \vec{H} &= \sigma \vec{E} + \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}\end{aligned}\tag{3.10}$$

Na faixa da sondagem MT a Terra comporta-se como um condutor ôhmico, isso implica que o meio não possui cargas livres, logo  $\rho \simeq 0$ .

Para os campos pode ser assumida uma dependência temporal harmônica dada por  $e^{-i\omega t}$ , que pode ser decomposta em vários harmônicos pela transformada de Fourier.

Portanto as equações: 3.9, 3.10, 3.4 e 3.5, podem ser reescritas como:

$$\nabla \times \vec{E} = i\omega\mu\vec{H}\tag{3.11}$$

$$\nabla \times \vec{H} = (i\omega\epsilon + \sigma)\vec{E}\tag{3.12}$$

$$\nabla \cdot \vec{H} = 0\tag{3.13}$$

$$\nabla \cdot \vec{E} = 0\tag{3.14}$$

Aplicando o rotacional na equação 3.12, obtemos:

$$\nabla \times \nabla \times \vec{H} = (i\omega\epsilon + \sigma)\nabla \times \vec{E}\tag{3.15}$$

Comparando a equação 3.15 com a equação 3.11, pode-se reescreve-la como:

$$\begin{aligned}\nabla \times \nabla \times \vec{H} &= (i\omega\epsilon + \sigma)\nabla \times \vec{E}; & \nabla \times \vec{E} &= i\omega\mu\vec{H} \\ \nabla \times \nabla \times \vec{H} &= i\omega\mu(i\omega\epsilon + \sigma)\vec{H}\end{aligned}\tag{3.16}$$

Pode-se expressar a equação 3.16 usando a seguinte identidade vetorial:

$$\nabla \times \nabla \times \vec{A} = \nabla(\nabla \cdot \vec{A}) - \nabla^2 \vec{A}\tag{3.17}$$

Portanto:

$$\begin{aligned}\nabla(\nabla \cdot \vec{H}) - \nabla^2 \vec{H} &= i\omega\mu(i\omega\epsilon + \sigma)\vec{H} \\ \nabla(\nabla \cdot \vec{H}) - \nabla^2 \vec{H} &= \vec{H}[i\omega\mu(i\omega\epsilon + \sigma)] \quad \nearrow \kappa^2 \\ \nabla(\cancel{\nabla \cdot \vec{H}}) - \nabla^2 \vec{H} &= \kappa^2 \vec{H} \quad \nearrow 0 \\ \nabla^2 \vec{H} + \kappa^2 \vec{H} &= 0; & \kappa^2 &= i\omega\mu(i\omega\epsilon + \sigma)\end{aligned}\tag{3.18}$$

Considerando um condutor ôhmico ( $\sigma \gg \omega\epsilon$ ), assim:

$$\kappa^2 = i\omega\mu\sigma \quad (3.19)$$

A equação 3.19 pode ser expressa seguindo a definição, como:

$$\begin{aligned} \kappa &= \sqrt{i\omega\mu\sigma}; \quad i = e^{i\frac{\pi}{2}} \\ \kappa &= \sqrt{\omega\mu\sigma} \sqrt{e^{i\frac{\pi}{2}}} \\ \kappa &= \sqrt{\omega\mu\sigma} e^{i\frac{\pi}{4}}; \quad e^{i\frac{\pi}{4}} = \sqrt{1/2}(1 + i) \\ \kappa &= \sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{2}}(1 + i) \\ \kappa &= \frac{(1 + i)}{\delta} \end{aligned} \quad (3.20)$$

Onde,

$$\delta_\omega = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}} \rightarrow \delta_f \approx 500 \sqrt{\frac{\rho_a}{f}} \quad (3.21)$$

Figura 2 – Gráfico do *skin-depth* em função da frequência [Hz]



### Breve descrição d gráfico

A equação 3.21 é chamada de *skin-depth*<sup>3</sup>, ela representa a profundidade de penetração da onda eletromagnética em um meio condutor. A partir da equação são mapeadas as litologias relacionando-as com a  $\rho_a$ .

### 3.4 Impedância Eletromagnética

Baseado na fundamentação teórica apresentada a seção anterior, o MT busca obter a resistividade aparente em função da profundidade.

A solução da equação 3.18 e da sua análoga para o campo  $\vec{E}$  são dadas por:

$$\vec{H}_{(\vec{r})} = \vec{H}e^{-\vec{k} \cdot \vec{r}} \quad (3.22)$$

$$\vec{E}_{(\vec{r})} = \vec{E}e^{-\vec{k} \cdot \vec{r}} \quad (3.23)$$

Onde  $\vec{k}$  é o vetor de onda cujo o módulo é definido na equação 3.19

Substituindo a equação 3.22 e 3.23 em 3.12, temos:

$$\begin{aligned} \nabla \times \vec{H}e^{-\vec{k} \cdot \vec{r}} &= (i\omega\epsilon + \sigma)\vec{E}e^{-\vec{k} \cdot \vec{r}}; \quad \sigma \gg i\omega\epsilon \\ \nabla \times \vec{H}e^{-\vec{k} \cdot \vec{r}} &= \sigma\vec{E}e^{-\vec{k} \cdot \vec{r}}; \quad \sigma = \frac{\kappa^2}{i\omega\mu} \\ \nabla \times \vec{H}e^{-\vec{k} \cdot \vec{r}} &= \frac{\kappa^2}{i\omega\mu}\vec{E}e^{-\vec{k} \cdot \vec{r}} \end{aligned} \quad (3.24)$$

Usando as identidades:

$$\nabla(e^{-\vec{k} \cdot \vec{r}}) = -e^{-\vec{k} \cdot \vec{r}}\vec{k} \quad (3.25)$$

$$\nabla \times \vec{C}(f_{(\vec{r})}) = -\vec{C} \times \nabla f_{(\vec{r})} \quad (3.26)$$

Pode-se reescreve a equação 3.24:

$$\begin{aligned} -\vec{H} \times (-e^{-\vec{k} \cdot \vec{r}}\vec{k}) &= \frac{\kappa^2}{i\omega\mu}\vec{E}e^{-\vec{k} \cdot \vec{r}} \\ e^{-\vec{k} \cdot \vec{r}}(\vec{H} \times \vec{k}) &= e^{-\vec{k} \cdot \vec{r}}\frac{\kappa^2}{i\omega\mu}\vec{E} \\ \vec{E} &= \frac{i\omega\mu}{\kappa^2}\vec{H} \times \vec{k} \\ \vec{E} &= \frac{i\omega\mu}{\kappa}\vec{H} \times \frac{\vec{k}}{\kappa} \end{aligned} \quad (3.27)$$

---

<sup>3</sup> Espessura pelicular

A relação  $\vec{k}/\kappa$  é o versor de  $\vec{k}$  ou  $\hat{k}$ , representando a ortogonalidade entre  $\vec{H}$  e  $\vec{E}$ .

A partir da equação anterior pode ser definido que  $Z = \omega\mu/\kappa$ , esta definição é conhecida como impedância intrínseca do meio ou impedância eletromagnética, também pode ser representada da seguinte forma:

$$Z = \frac{|\vec{E}|}{|\vec{H}|} = \frac{\omega\mu}{\kappa} = \sqrt{\omega\mu\rho}e^{i\frac{\pi}{4}} \quad (3.28)$$

A impedância eletromagnética ( $Z$ ) pode ser decomposta em função das componentes de  $\vec{E}$  e  $\vec{H}$ , representada na forma matricial:

$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} H_x \\ H_y \end{pmatrix} \quad (3.29)$$

O método MT então obtém a resistividade aparente a partir da impedância eletromagnética, e atribui a ela uma profundidade, onde pode ser definida pela função de *skin-depth*.



## **4 AQUISIÇÃO DE DADOS E DEPENDÊNCIAS**

### **4.1 Dependências e Processamento MT**

#### **4.1.1 Aquisição de Dados MT**

#### **4.1.2 Formatos de Arquivos de Dados MT**

#### **4.1.3 Processamento Robusto – EMTF**

##### **4.1.3.1 Mudança Tempo/Frequência Angular**

##### **4.1.3.2 Função de Transferências**

#### **4.1.4 Pacotes de Processamento do Grupo Geoma – INPE**





## **5 DESENVOLVIMENTO E ARQUITETURA DO PAMPAMT**



## **6 RESULTADOS E APLICAÇÃO DO PAMPAMT**

contaração do tempo de processamnto  
aprendizagem dados mt

### **6.1 Aplicação do PampaMT**

#### **6.1.1 Área de Estudo**

#### **6.1.2 Contexto Geológico**

#### **6.1.3 Processamento dos Dados**

#### **6.1.4 Resultados e Interpretação Geofísica**



## **7 CONSIDERAÇÕES FINAIS**



## REFERÊNCIAS

CAGNIARD, L. Basic theory of the magneto-telluric method of geophysical prospecting. **Geophysics**, Society of Exploration Geophysicists, v. 18, n. 3, p. 605–635, 1953.

MTNET. 2018. MTNet. Disponível em: <http://mtnet.info/main/index.html>. Acesso em: 19 nov. 2018.

PÁDUA, M. B. d. **Estudos de indução eletromagnética na caracterização de estruturas profundas sob a borda sul do cráton de São Francisco**. Tese (Doutorado) — Brasil. Ministério da Ciência e Tecnologia. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 2004.

PARKINSON, W. D. **Introduction to Geomagnetism**. Edinburgh: Scottish Academic Press, 1983.

TIKHONOV, A. On determining electric characteristics of the deep layers of the earth's crust. **Dokl. Acad. Nauk. SSSR**, v. 73, p. 295–297, 1950.