3.3 Литосфера и астеносфера по электропроводности

Характеристики: *удельное сопротивление* ρ и *проводимость* **σ = 1/ρ**

Основы магнитотеллурического метода

Теллурические токи (*telluris – Земля*) - электрические токи, текущие в верхних оболочках Земли.

Происхождение: вариации МП Земли (наводящие токи согласно закону ЭМ индукции), электрическое поле атмосферы.

Принцип: **отношение** взаимно перпендикулярных горизонтальных компонент электрического и магнитного полей (**импеданс** $Z = E_x / H_y = - E_y / H_x$), измеренных на поверхности Земли, **зависит от периода** вариации и изменения **проводимости с глубиной**.

При этом: **чем больше период** вариаций, **тем глубже** проникает поле внутрь Земли. Изменение импеданса **с увеличением периода** отражает изменение удельного **сопротивления с глубиной**. Кажущееся **удельное сопротивление** ρ:

$$\rho = (\omega\mu_0)^{-1} Z^2$$

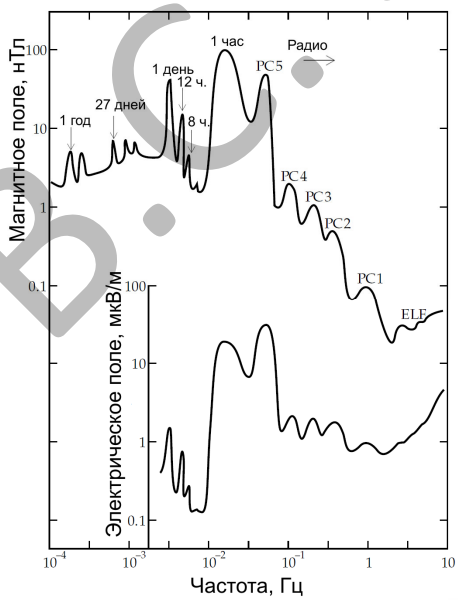
где $\omega = 2\pi/T$ – круговая частота, T – период вариации (с), Z – в Ом, ρ – в Ом·м.

Регистрируя вариации естественного электромагнитного поля в широком интервале периодов, можно **построить** **зависимость кажущегося удельного** сопротивления от периода (а значит, и от **глубины**).

Метод хорошо работает для среды, электропроводность которой меняется только по вертикали $\rho = \rho(z)$. Для случая $\rho = \rho(x,y,z)$ – сложнее.

12

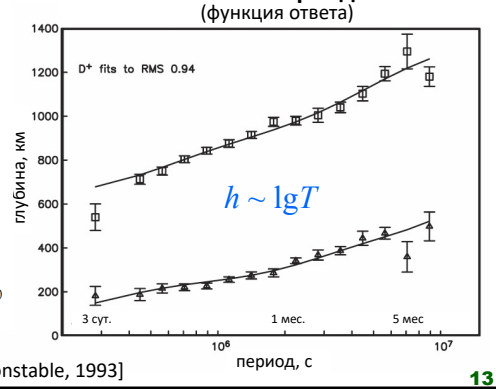
Спектр коротковолновых вариаций электромагнитного поля



[Lowrie, 2007]

Глубина проникновения ЭМП h в зависимости от периода волны T

(функция ответа)



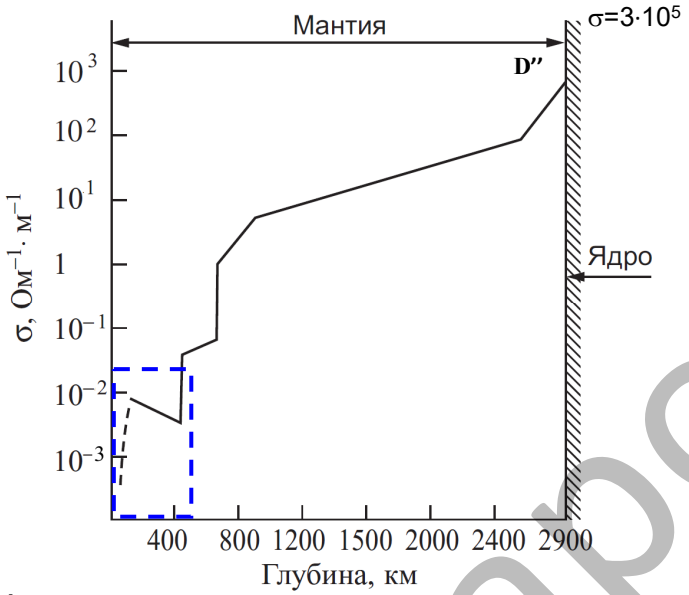
[Constable, 1993]

13

В.С. Захаров

Результаты

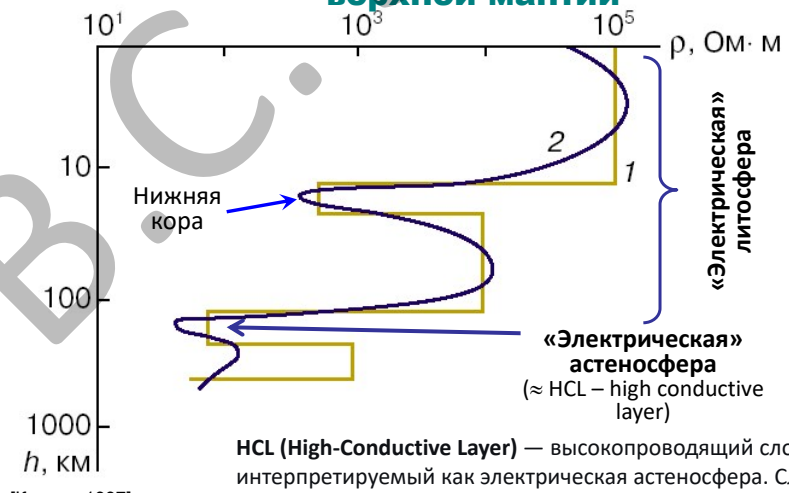
Распределение проводимости в мантии



[Жарков, 2013]

14

Профиль удельного сопротивления в коре и верхней мантии



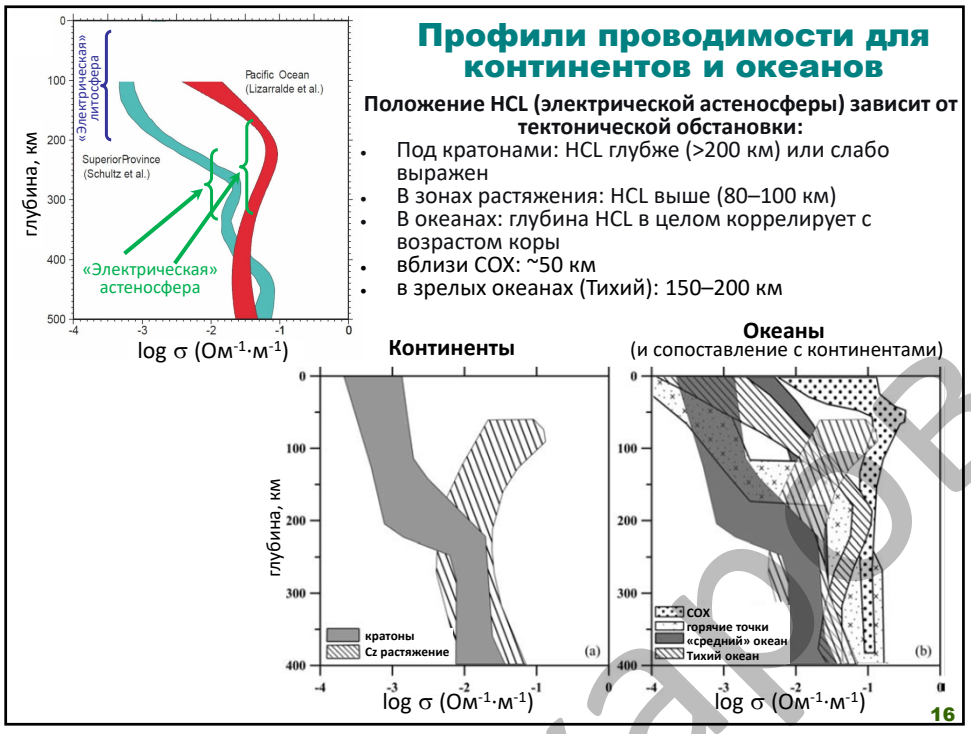
[Ковтун, 1997]

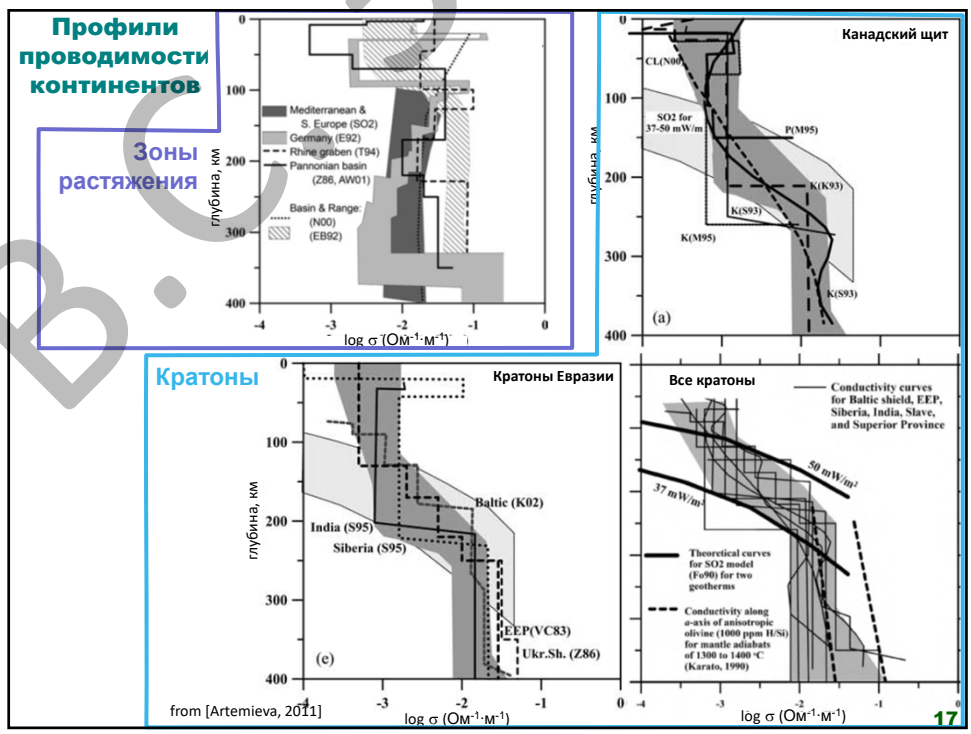
HCL (High-Conductive Layer) — высокопроводящий слой, интерпретируемый как электрическая астеносфера. Слой с повышенным сопротивлением над HCL — электрическая литосфера. Контраст сопротивления может достигать нескольких порядков.

- **Чередование** слоев с повышенной и пониженной проводимостью.
- Отражение **реологической расслоенности** тектоносферы.
- Возможная причина образования HCL – частичное плавление, наличие воды.

15

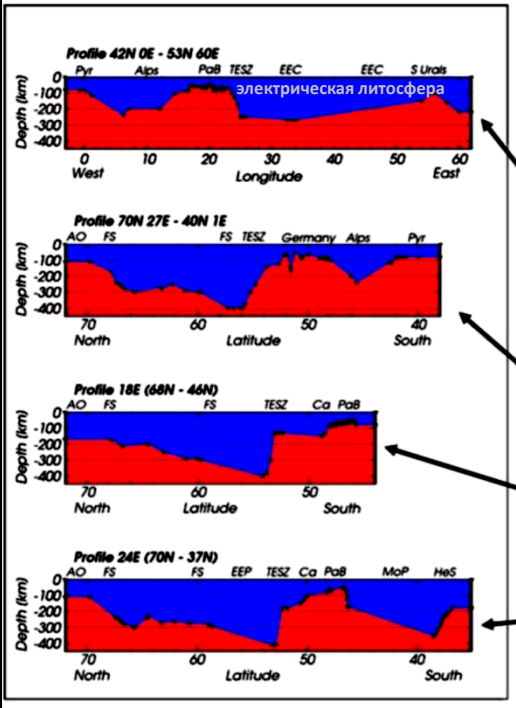
В.С. Захаров


Профили проводимости для континентов и океанов
Положение HCL (электрической астеносферы) зависит от тектонической обстановки:
• Под кратонами: HCL глубже (>200 км) или слабо выражен
• В зонах растяжения: HCL выше (80–100 км)
• В океанах: глубина HCL в целом коррелирует с возрастом коры
• вблизи СОХ: ~50 км
• в зрелых океанах (Тихий): 150–200 км
«Электрическая» литосфера
Pacific Ocean (Lizarralde et al.)
SuperiorProvince (Schultz et al.)
«Электрическая» астеносфера
глубина, км
log σ (Ом-1·м-1)
Континенты
Океаны
(и сопоставление с континентами)
кратоны
Cz растяжение
СОХ
горячие точки
«средний» океан
Тихий океан
16


Профили проводимости континентов
Зоны растяжения
Mediterranean & S. Europe (SO2)
Germany (E92)
Rhine graben (T94)
Pannonian basin (Z86, AW01)
Basin & Range: (N00) (EB92)
Канадский щит
CL(N00)
SO2 for 37-50 mW/m
P(M95)
K(K93)
K(S93)
K(M95)
Кратоны
Кратоны Евразии
Baltic (K02)
India (S95)
Siberia (S95)
EEP(VC83)
Ukr.Sh. (Z86)
Все кратоны
Conductivity curves for Baltic shield, EEP, Siberia, India, Slave, and Superior Province
50 mW/m2
37 mW/m2
Theoretical curves for SO2 model (Fo90) for two geotherms
Conductivity along a-axis of anisotropic olivine (1000 ppm H/Si) for mantle adiabats of 1300 to 1400 °C (Karato, 1990)
глубина, км
log σ (Ом-1·м-1)
from [Artemieva, 2011]
17

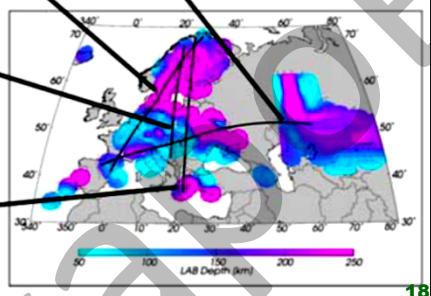
В.С. Захаров

Мощность «электрической» литосферы Европы



Цветом показана глубина кровли HCL (≈ мощность электрической литосферы). Максимальные значения соответствуют кратонным областям (Восточно-Европейская платформа)

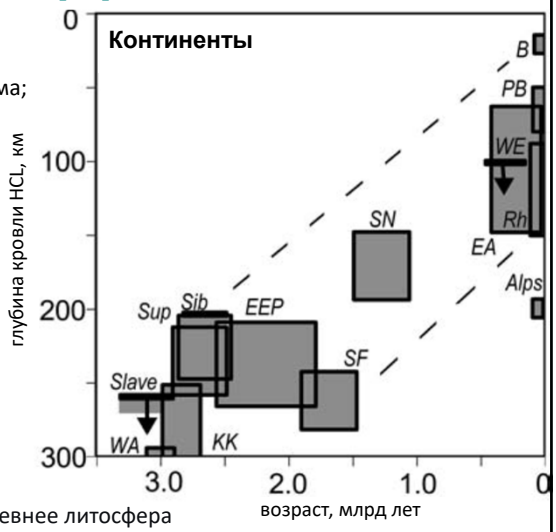
from [Hjelt, Korja, 1993; Korja, 2007]



18

Глубина кровли проводящего слоя (HCL) (=мощность «электрической» литосферы) и возраст литосферы континентов

B = Байкальский рифт;
EA = Восточная Австралия;
EEP = Восточно-Европейская платформа;
PB = Паннонский бассейн;
Rh = Рейнский грабен;
KK, SF и SN = Кольско-Карельская, Свеко-Феннская и Свеко-Норвежская провинции Балтийского щита;
Sib = южная окраина Сибирского кратона;
Sup = Провинция Супериор;
WA = Западная Африка;
WE = Западная Европа.



Систематическая зависимость: чем древнее литосфера (кратоны), тем больше мощность электрической литосферы (глубже HCL). Для молодых провинций (Байкальский рифт) HCL расположен значительно выше

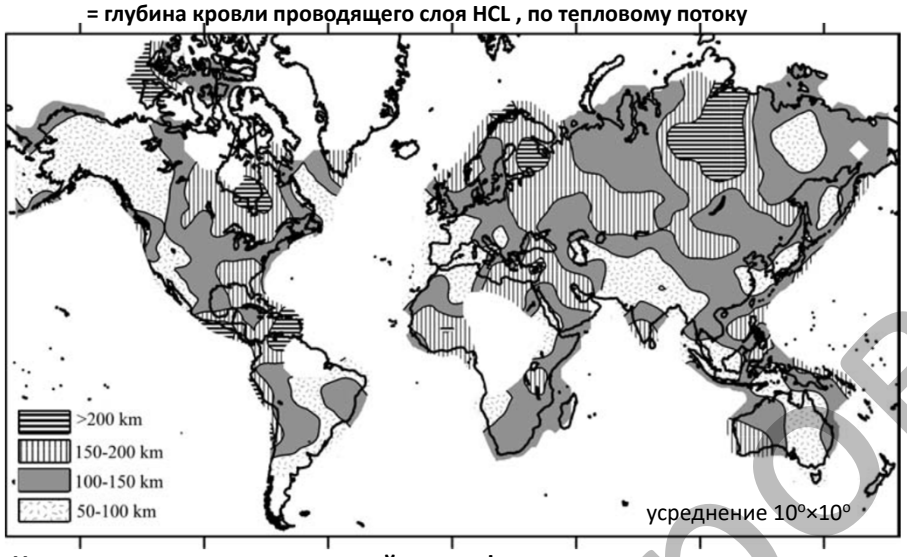
from [Korja, 2007]

19

В.С. Захаров

Мощность электрической литосферы

= глубина кровли проводящего слоя HCL , по тепловому потоку



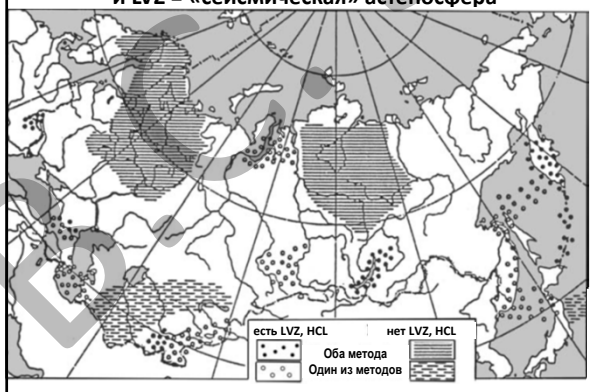
Нижняя граница «электрической» литосферы:

- **не контрастная**, зависит от критерия ее выделения;
- положение **зависит** от состава, теплового режима, наличия воды

from [Artemieva, 2011]

20

Проводящий слой (HCL) = «электрическая астеносфера» и LVZ = «сейсмическая» астеносфера



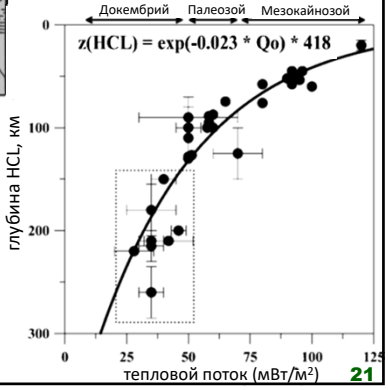
Сопоставление с другими методами

HCL и LVZ не проявлены под кратонами проявлены в зоне рифта, зоне субдукции

- Кратоны (Восточная Сибирь, Восточно-Европейская платформа): ни HCL, ни LVZ не проявлены → астеносфера сильно утонена или отсутствует
- Зоны рифта (Байкал): проявлены оба → астеносфера поднята высоко
- Зоны субдукции (Камчатка, Курилы): проявлены оба → активное взаимодействие
- Некоторые регионы: проявлен только один → методы дополняют друг друга

from [Artemieva, 2011]

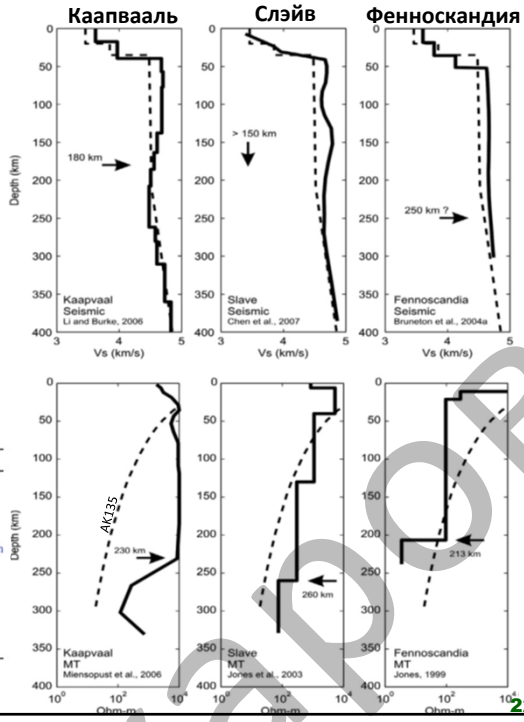
Глубина кровли HCL
(=мощность «электрической» литосферы) и тепловой поток для континентальной литосферы разного возраста



21

В.С. Захаров

1-D модели распределения скоростей Vs и удельного электрического сопротивления для трех кратонов



Сводка оценок мощности литосферы для трех кратонов

	Kaapvaal	Slave	Fennoscandia[a]
Xenolith (thickness of TBL)	>195–215 km	>170–215 km	>245 km
Strain rate > 10^{-15} s^{-1} under dry conditions[b]	245 km	235 km	220 km
Seismic	180 km (Li and Burke, 2006)	>150 km (Chen et al., 2007)	Consistent with 250 km (Bruneton et al., 2004a)
S-Receiver function	~250–300 km (Kumar et al., 2007)		
Magnetotelluric (MT)	230 km (Miensopust et al., 2006)	210 km at LdG 260 km average (Jones et al., 2003)	205 km at NAT (Jones, 1999) >300 km (Korja, 2007)

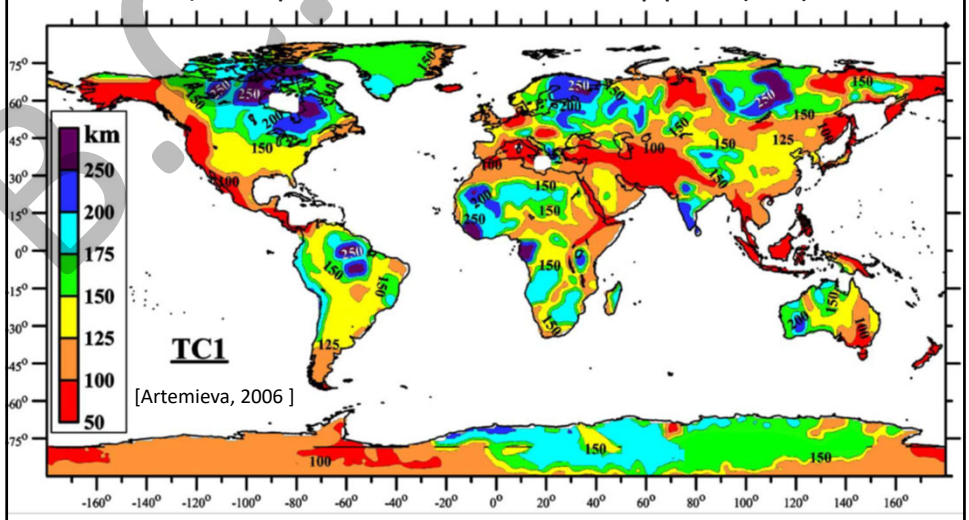
Eaton et al., 2009

22

Термальная литосфера

Границу **термальной** литосферы проводят по изотерме (обычно ≈ 1300°C)

Мощность термальной континентальной литосферы TC1 (1°×1°)



23

В.С. Захаров

Задачи

Задача 2.1. *Сравнение мощности сейсмической литосферы по разным критериям*

Условие:

Для некоторого региона получены два значения мощности сейсмической литосферы:

- по контрасту скорости δV = 1%: H_1 = 120 км
- по контрасту скорости δV = 2%: H_2 = 160 км

На сколько процентов различаются эти оценки?

Какой критерий, по вашему мнению, дает более «консервативную» оценку мощности литосферы?

Задача 2.2. *Анализ зоны пониженных скоростей*

В таблице приведены данные по скоростям S-волн (Vs) на разных глубинах для некоторого региона:

Вопросы:

- На каких глубинах наблюдается зона пониженных скоростей (ЗПС)?
- Какова мощность этой зоны?
- Какую глубину вы примете за верхнюю границу сейсмической литосферы?
- Какую глубину вы примете за нижнюю границу сейсмической литосферы (границу с астеносферой)?
- Оценить средние скорости Vs для выделенных слоев

Глубина, км	Vs, км/с
0	3.5
35	4.2
80	4.5
120	4.3
160	4.2
200	4.4
250	4.7
300	4.9

Задача 2.3. *Построение профиля сопротивления*

По данным магнитотеллурического зондирования получены значения удельного сопротивления ρ (Ом·м) на разных глубинах:

Задание:

- Вычислите значения ρ (в Ом·м) для каждой глубины.
- Постройте график $\log_{10}$ ρ от глубины.
- Выделите на графике слои, которые можно интерпретировать как:
  - кору
  - электрическую литосферу
  - электрическую астеносферу (HCL)
- Оценить средние значения проводимости для выделенных слоев

Глубина, км	$\log_{10}$ ρ (ρ в Ом·м)
0	3.0
10	2.8
25	3.5
40	2.0
60	3.0
80	3.8
120	2.5
160	2.0
200	2.5
250	3.0

24

Список литературы

Artemieva, I.M. (2011). *The Lithosphere: An Interdisciplinary Approach.* Cambridge University Press.

Artemieva, I.M. (2006). Global 1°×1° thermal model TC1 for the continental lithosphere: implications for lithosphere secular evolution. *Tectonophysics*, 416(1-4), 245-277.

Dziewonski, A.M., & Anderson, D.L. (1981). Preliminary reference Earth model. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 25(4), 297-356.

Kennett, B.L.N., & Engdahl, E.R. (1991). Traveltimes for global earthquake location and phase identification. *Geophysical Journal International*, 105, 429-465.

Pasyanos, M.E., Masters, T.G., Laske, G., & Ma, Z. (2014). LITHO1.0: An updated crust and lithospheric model of the Earth. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 119(3), 2153-2173.

Grand, S.P. (1997, 2002). Global seismic tomography (volume waves). [Цитируется в лекции]

Shapiro, N.M., & Ritzwoller, M.H. (2002). Global seismic tomography (surface waves). [Цитируется в лекции]

Müller, R.D., et al. (2002). Age, spreading rates, and spreading asymmetry of the world's ocean crust. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 9(4).

Ковтун, А.А. (1997). [Цитируется в лекции по электропроводности]

Жарков, В.Н. (2013). *Физика Земли.* [Цитируется в лекции по распределению проводимости]

Hjelt, S.E., & Korja, T. (1993); Korja, T. (2007). Electrical lithosphere of Europe. [Цитируется в лекции]

Lowrie, W. (2007). *Fundamentals of Geophysics.* Cambridge University Press.

Constable, S. (1993). [Цитируется в лекции по глубине проникновения ЭМП]

25

В.С. Захаров