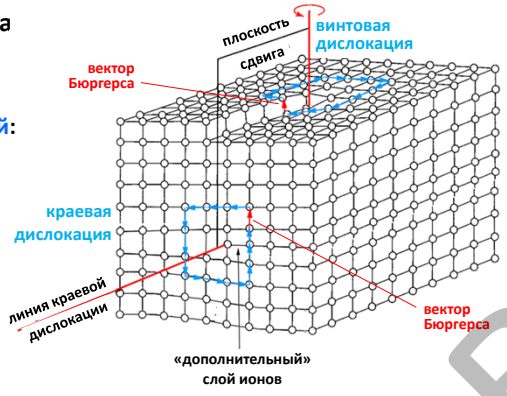
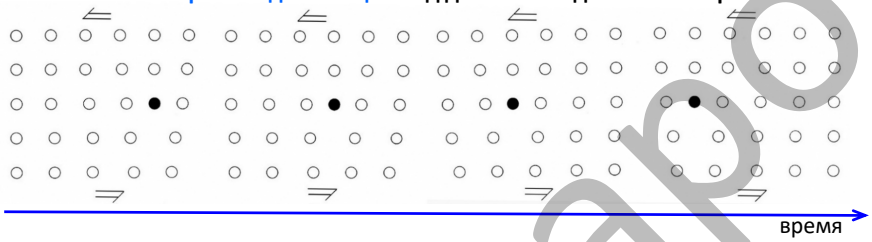
Дислокационная ползучесть

Дислокации – нарушение порядка расположения атомов в кристаллической решетке

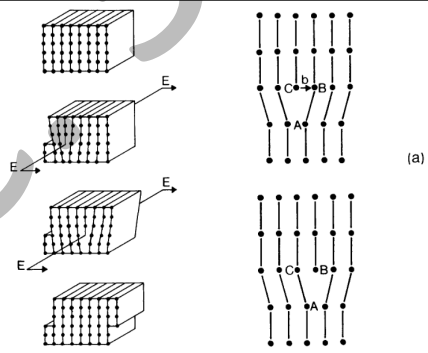
Виды дислокаций:
- краевая
- винтовая



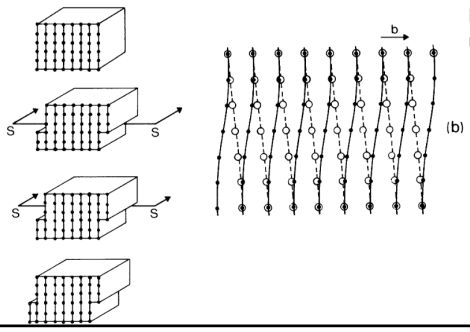
Скольжение краевой дислокации под действием сдвиговых напряжений



24



Крип при скольжении краевой дислокации



Крип при скольжении винтовой дислокации

25

В.С.Захаров

Дислокационная ползучесть

приводит к деформации **по нелинейному криповому закону**

для дислокационной ползучести $n > 1$,

влиянием размера зерен можно пренебречь ($m \approx 0$)

$$\dot{\varepsilon} = A w^r \sigma^n \exp\left(-\frac{E_{\text{dsl}} + pV_{\text{dsl}}}{RT}\right)$$

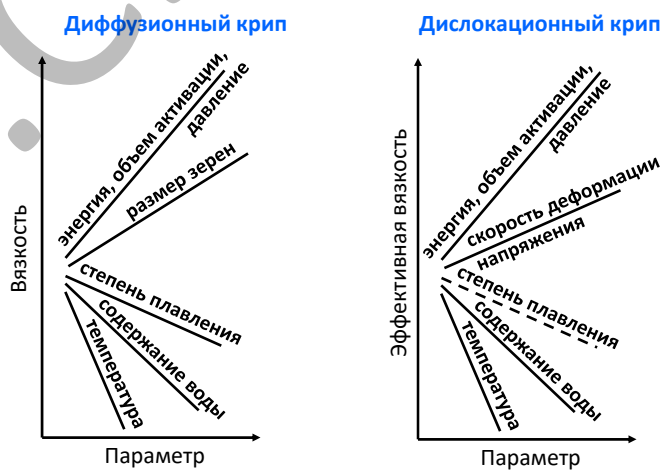
можно вести **эффективную** вязкость: $\sigma = \eta_{\text{dsl}} \cdot \dot{\varepsilon}$

$$\eta_{\text{dsl}} = \frac{\dot{\varepsilon}^{(1-n)/n}}{(Aw^r)^{1/n}} \exp\left(\frac{E_{dsl} + pV_{dsl}}{nRT}\right) \quad \text{или} \quad \eta_{\text{dsl}} = \frac{\sigma^{1-n}}{Aw^r} \exp\left(\frac{E_{dsl} + pV_{dsl}}{RT}\right) \quad (*)$$

зависит от состава (A, E, V, r, n), P, T, содержания воды, скорости деформации, тектонических напряжений

26

Качественная зависимость вязкости твердого тела от параметров

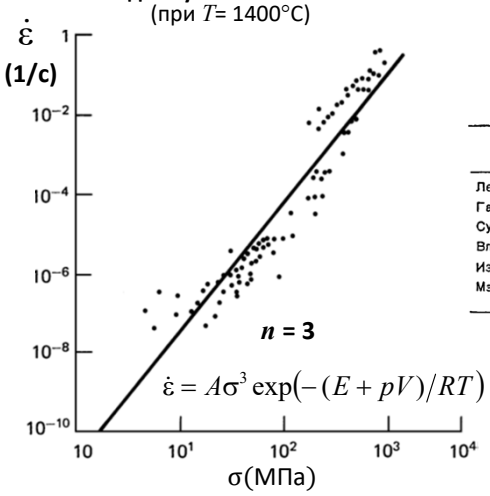


27

В.С. Захаров

Экспериментальные реологические параметры

Зависимость напряжение – скорость деформации для сухого оливина
(при T= 1400°C)



(Ashby, Verrall, 1978).

Значения реологических параметров для некоторых геологических материалов

Материал	A, МПа$^{-n}$· с$^{-1}$	n	E_a, кДж/моль
Лед	$8{,}8 \cdot 10^5$	3	60,7
Галит	$9{,}5 \cdot 10^{-1}$	5,5	98,3
Сухой кварцит	$6{,}7 \cdot 10^{-12}$	6,5	268
Влажный кварцит	$4{,}4 \cdot 10^{-2}$	2,6	230
Известняк	$4{,}0 \cdot 10^3$	2,1	210
Мэрилендский диабаз	$5{,}2 \cdot 10^2$	3	366

(Теркот, Шуберт, 1985)

28

Задача

3.1. В таблице представлены данные по соотношению напряжения σ и скорости деформации $\dot{\varepsilon}$, полученные в экспериментах для сухого оливина. Определить величину параметра n в соотношении для дислокационной ползучести.

σ (МПа)	$\dot{\varepsilon}$ (1/c)
7.644E+03	6.383E+00
3.072E+01	1.376E-06
1.770E+03	2.484E-01
6.482E+03	1.985E+01
8.007E+03	2.023E+01
6.432E+01	4.615E-06
1.978E+03	5.579E-01
5.877E+02	1.875E-02
1.895E+03	2.827E-01
6.783E+03	1.585E+01
2.292E+01	6.751E-07
9.679E+02	1.342E-02
2.060E+03	3.337E-01
1.296E+02	2.944E-05
1.273E+01	2.665E-08
1.191E+01	7.109E-08
7.185E+03	2.426E+01
9.265E+02	5.490E-02
1.537E+03	2.697E-01
1.086E+02	3.613E-05
8.358E+01	1.681E-05
3.581E+01	1.312E-06
2.687E+03	9.781E-01
9.896E+02	2.881E-02
3.478E+03	6.739E-01
1.225E+03	3.656E-02
4.877E+02	6.453E-03
1.957E+03	4.478E-01
2.332E+01	6.284E-07
1.627E+01	1.045E-07

29

В.С. Захаров

Параметры ползучести вещества мантии (по оливину)

Параметры **диффузионной линейной ползучести**
для сухого (*индекс 1*) и влажного (*индекс 2*) **оливина** по экспериментальным данным

		[Karato, Wu, 1993]	[Hirth, Kohlstedt, 2003]	[Korenaga, Karato, 2008]
сухой	A_1, (мПа)$^{-1}$ (мкм)^m с$^{-1}$	$10^{9.38}$	$10^{9.18}$	$10^{5.25 \pm 0.0}$
	m_1	2.5	3	2.98 ± 0.02
	E_1, кДж/моль	300	375 ± 50	261 ± 28
	V_1, см^3/моль	6	2–10	6 ± 5
влажный	A_2, (мПа)$^{-1}$ (мкм)^m с$^{-1}$	$10^{5.15}$	$10^{6.0}$	$10^{4.32 \pm 0.38}$
	m_2	2.5	3	2.56 ± 0.24
	r_2	–	1	1.93 ± 0.07
	E_2, кДж/моль	240	335 ± 75	387 ± 53
	V_2, см^3/моль	5	4	25 ± 4

Параметры **дислокационной степенной ползучести**
для сухого (*индекс 3*) и влажного (*индекс 4*) **оливина**

		[Karato, Wu 1993]	[Hirth, Kohlstedt, 2003]	[Korenaga, Karato, 2008]
сухой	A_3, (мПа)$^{-n}$ с$^{-1}$	$10^{-1.22}$	$10^{5.04}$	$10^{6.09 \pm 0.11}$
	n_3	3.5	3.5 ± 0.3	4.94 ± 0.05
	E_3, кДж/моль	540	530 ± 4	610 ± 30
	V_3, см^3/моль	15–25	14–27	13 ± 8
влажный	A_4, (мПа)$^{-n}$ с$^{-1}$	$10^{1.0}$	$10^{1.95}$	$10^{0.6 \pm 0.5}$
	n_4	3.0	3.5 ± 0.3	3.60 ± 0.24
	r_4	–	1.2	1.95 ± 0.05
	E_4, кДж/моль	430	480 ± 40	523 ± 100
	V_4, см^3/моль	10–20	11	4 ± 3

Из (Трубицын, 2012)

30

Параметры ползучести материалов коры

Creep parameters of crustal materials (from compilations by Kirby 1983, Kirby and Kronenberg 1987, Ranalli and Murphy 1987, and Ji and Zhao 1993; data marked with an asterisk from Wilks and Carter 1990)

Material	A (MPa^{-n} s^{-1})	n	E (kJ mol^{-1})
rock salt	6.3	5.3	102
quartz	1.0×10^{-3}	2.0	167
plagioclase (An_{75})	3.3×10^{-4}	3.2	238
orthopyroxene	3.2×10^{-1}	2.4	293
clinopyroxene	15.7	2.6	335
granite	1.8×10^{-9}	3.2	123
granite (wet)	2.0×10^{-4}	1.9	137
quartzite	6.7×10^{-6}	2.4	156
quartzite (wet)	3.2×10^{-4}	2.3	154
quartz diorite	1.3×10^{-3}	2.4	219
diabase	2.0×10^{-4}	3.4	260
anorthosite	3.2×10^{-4}	3.2	238
felsic granulite (*)	8.0×10^{-3}	3.1	243
mafic granulite (*)	1.4×10^{4}	4.2	445

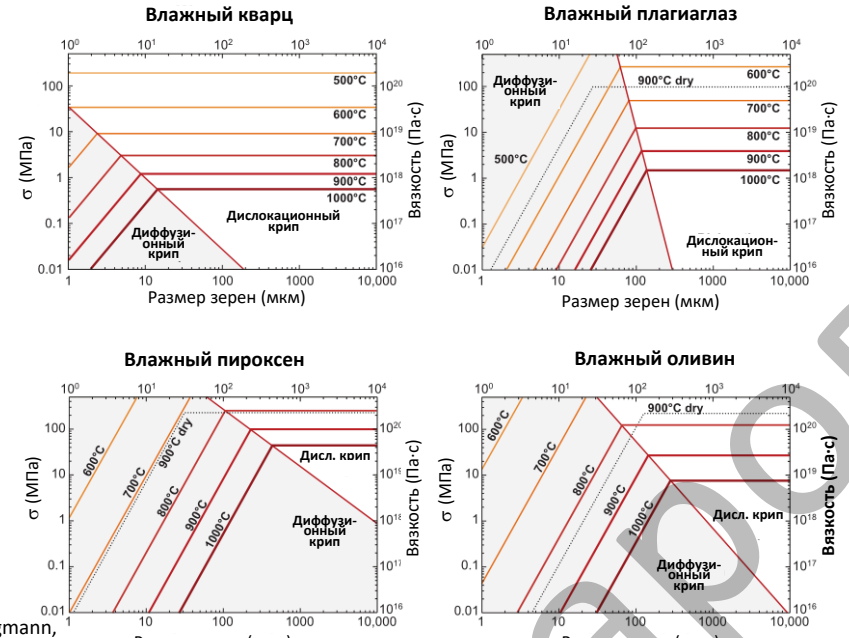
(Ranalli, 1995)

31

В.С. Захаров

Реологическое поведение минералов

в зависимости от напряжения (девиатора) σ, *T*, размера зерен, H_2O

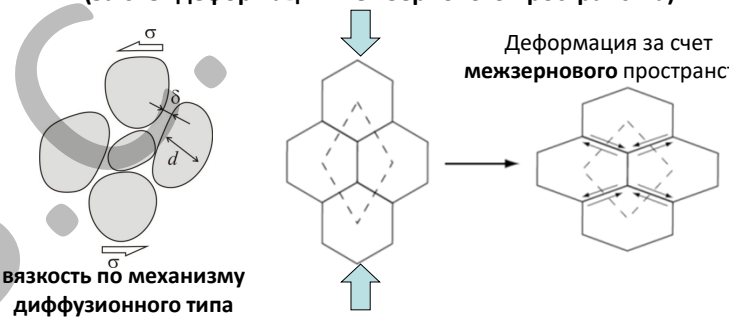


(Burgmann, Dresen, 2008)

32

Вязкость по границам зерен

(за счет деформации межзернового пространства)



вязкость по механизму диффузионного типа

Деформация за счет **межзернового** пространства

Деформации по границам зерен ограничены **предельной величиной** $\varepsilon^* \sim \frac{\delta}{d} \sim 10^{-5}$

$\eta_{gb} \sim 10^{-10}\eta_g$

вязкость по гран.зерен — **криповая вязкость**

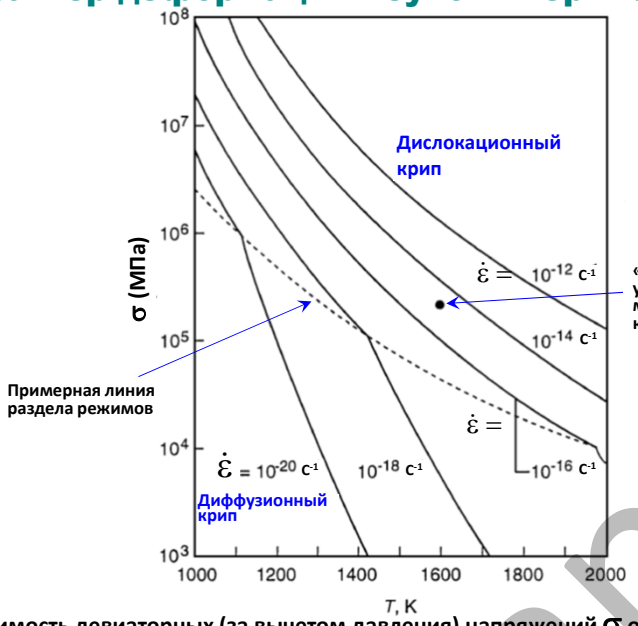
Резюме для вязкости вещества Земли: могут реализовываться **несколько механизмов вязкости**, которые проявляются при **разных *P-T*** условиях и **масштабах** воздействия.

Может быть **разная (на несколько порядков) величина вязкости** для процессов **разных** пространственных и временных **масштабов**

33

В.С. Захаров

Характер деформации «сухой» верхней мантии



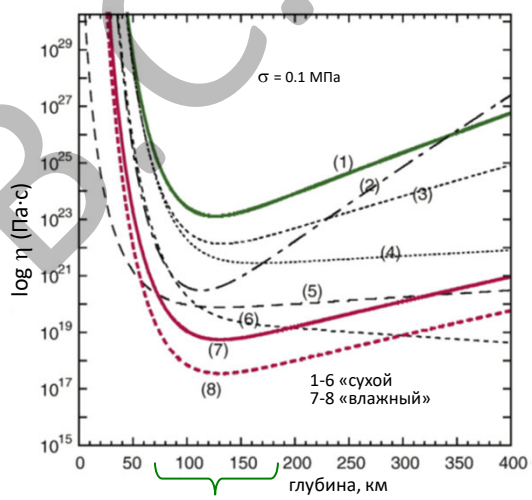
Зависимость девиаторных (за вычетом давления) напряжений σ от температуры *T* для различной скорости деформации $\dot{\varepsilon}$

34

Вязкость верхней мантии

(*эффективная* вязкость, рассчитанная по оливину для океанической геотермы)

$$\sigma = \eta_{eff} \cdot \dot{\varepsilon}$$



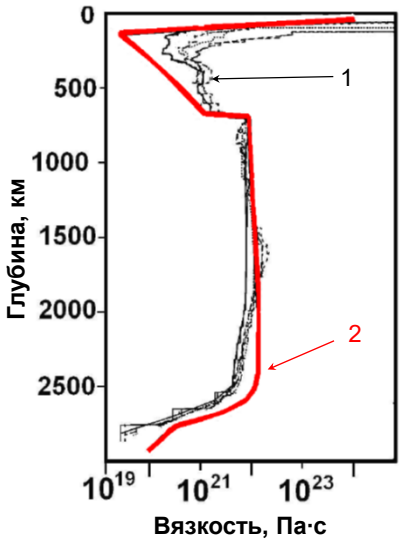
Значительный разброс оценок

1 – Kawazoe et al., 2009;
2 – Borch and Green, 1987;
3 – Karato and Rubie, 1997;
4 – Bussod et al., 1993;
5 – Raterron et al., 2007;
6 – Li et al., 2006;
7 – for 0.007 wt% H2O, Karato and Jung, 2003;
8 – for 0.07 wt% H2O, Karato and Jung, 2003

~ **астеносфера** как слой пониженной вязкости

35

В.С. Захаров



Мантия

эффективная вязкость $\sigma = \eta_{eff} \cdot \dot{\varepsilon}$

Распределение вязкости в мантии Земли по различным моделям

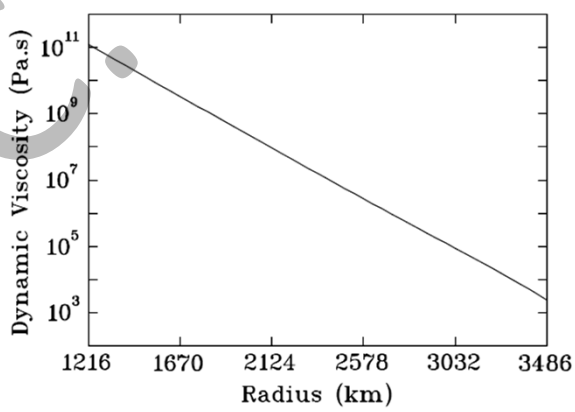
1. По различным данным для **послеледниковых поднятий** [Paulson et al., 2005].
2. Рассчитанные по соотношению (*) на основании **данных о составе и *P-T* условиях** [Трубицын, 2016].

Внешнее ядро	По затуханию сейсмических волн	$\eta << 10^8$ Па·с
	По модели генерации МП	$\eta \sim 0.05$ Па·с
Внутреннее ядро	По затуханию сейсмических волн	$\eta \sim 10^{16}$ Па·с
	По криповому механизму	$\eta \sim 10^{10}$ - 10^{16} Па·с

[Olson, 2007]

36

Профиль вязкости внешнего ядра Земли



Smylie, Palmer, 2007

38

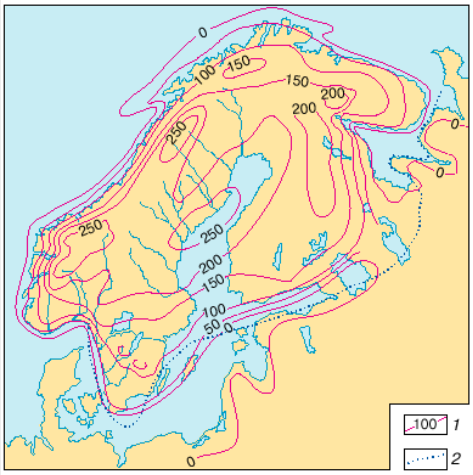
В.С. Захаров

4. Реология литосферы и астеносферы

Оценка вязкости астеносферы (верхней мантии) по постледниковому поднятию

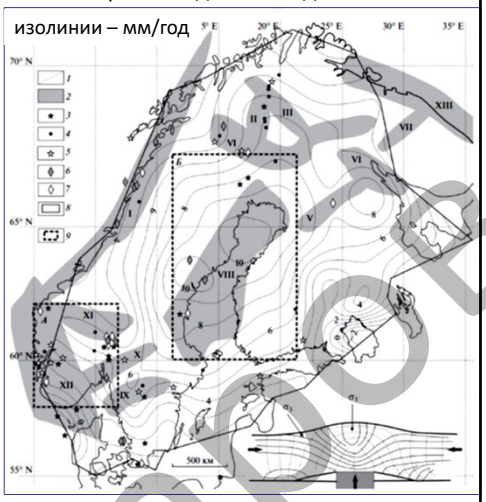
Динамика постледникового поднятия Скандинавии

величина поднятия за 7-8 тыс лет



Никонов, 1977

скорости поднятия по данным ГНСС



Стеблов и др., 2022

39

Геодинамическая схема динамики земной поверхности при оледенении и исчезновении ледника

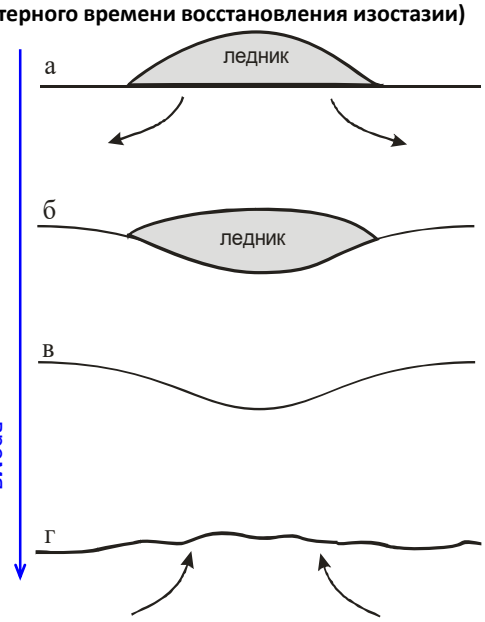
(считая время оледенения << характерного времени восстановления изостазии)

(а) – до оледенения,

(б) – опускание поверхности, вызванное весом ледника,

(в) – положение поверхность после таяния ледника,

(г) – изостатическое восстановление.

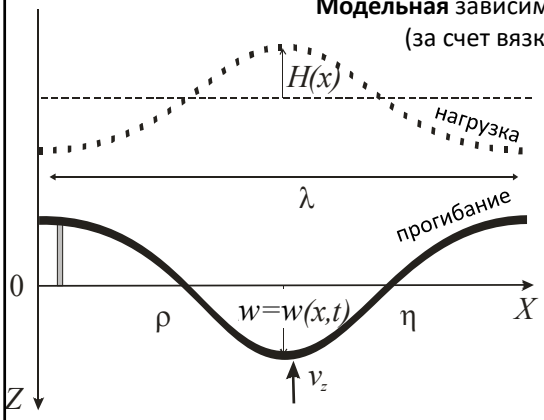


40

В.С. Захаров

Модель восстановления изостазии за счет вязких течений в астеносфере

Модельная зависимость величины прогиба от времени (за счет вязкого течения в астеносфере):



$$w = w_0 e^{-at}\cos\frac{2\pi x}{\lambda}$$

или

$$w = w_0 e^{-t/\tau}\cos\frac{2\pi x}{\lambda}$$

w_0 – начальное прогибание
τ – характерное время
ρ – плотность астеносферы
η – вязкость
λ – ширина нагрузки

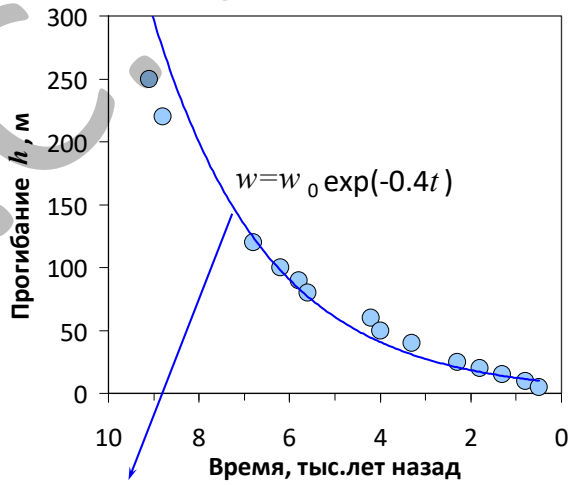
Параметры, характеризующие **динамику** постгляционного поднятия, связаны с **вязкостью η верхней мантии (астеносферы)** (если вязкость не меняется с глубиной):

$$\alpha = \frac{\rho g \lambda}{4\pi\eta}$$ или $$\tau = \frac{1}{\alpha} = \frac{4\pi\eta}{\rho g \lambda}$$

41

Динамика постледникового поднятия Скандинавии

по геолого-геоморфологическим данным



α ≈ 0.4 1/тыс лет; τ ≈ 2500 лет

при ρ ≈ 3.3 г/см³, λ ≈ 1000 км → **η ≈ 2·10²⁰ Па·с**

η ~ 10²⁰ Па·с

[Артюшков, 1979; Теркот, Шуберт, 1985]

42

В.С. Захаров

Задача

3.2. По результатам изменения постледникового прогибания w во времени оценить величину вязкости верхней мантии (астеносферы).

Время, тыс лет	w, м
9.7	265
9.6	245
9.3	220
8.3	166
7.2	121
6.6	91
5.8	70
4.6	50
4.1	43
3.4	35
2.5	27
1.8	31
1.3	25
0.8	17
0.5	22
0.1	14

43

Прочность литосферы

Два основных механизма разрушения в верхних слоях Земли

Механизм 1. Достижение предела хрупкого разрушения σ_d

$$\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3 = \alpha\rho g z(1-\lambda)$$ - закон Бирли [Byerlee, 1978]

$\lambda = P_{fl}/P$ - отношение порового давления флюида к литостатическому,

α – параметр, определяемый типом разлома:

$$\alpha = \begin{cases} 1 - R^{-1} & \text{для сброса} \\ R-1 & \text{для взброса} \\ (R-1)/(1+\beta(R-1)) & \text{для сдвига} \end{cases}$$

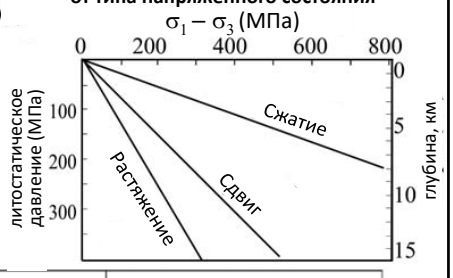
где $R=((1+\phi^2)^{1/2}-\phi)^{-2}$

$\tan\beta=(\sigma_2-\sigma_3)/(\sigma_1-\sigma_3) < 1$,

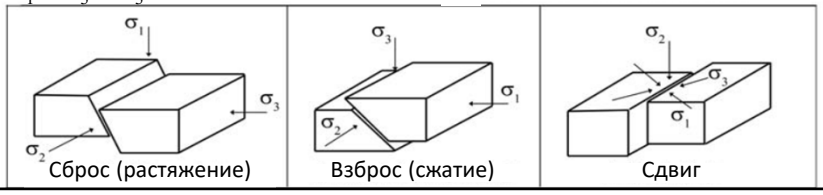
ϕ – угол внутр. трения (обычно 30 –33°)

$\tan\phi$ – коэф. внутреннего трения

Зависимость предела хрупкого разрушения от типа напряженного состояния



$\sigma_1 > \sigma_3 > \sigma_3$



Сброс (растяжение) Взброс (сжатие) Сдвиг

44

В.С. Захаров

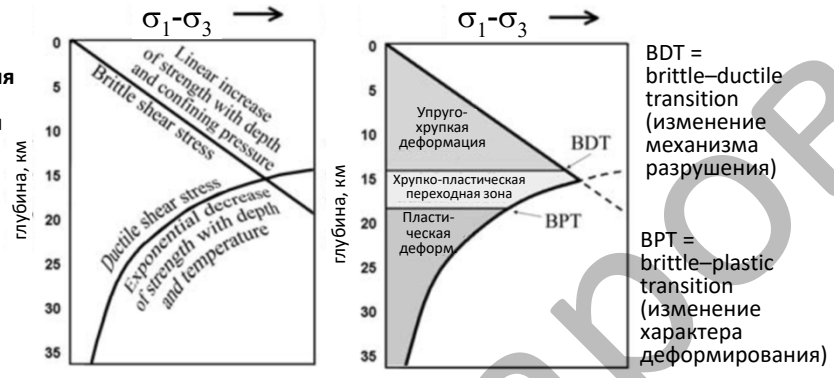
Механизм 2. Достижение определенной скорости крипа $\dot{\varepsilon} \sim 10^{-16} \div 10^{-12}\ c^{-1}$

$$\dot{\varepsilon} = A(\sigma_1 - \sigma_3)^n \exp\left(-(E + pV)/RT\right)$$

Кривые прочности по модели Brace & Geotze

Принцип построения: реализуется такой механизм разрушения, для которого предел прочности меньше (при данных P-T условиях)

Кора: принцип построения кривой прочности



BDT = brittle–ductile transition (изменение механизма разрушения)

BPT = brittle–plastic transition (изменение характера деформирования)

45

Влияние флюидов

Лабораторные эксперименты :

- В условиях верхней коры присутствие воды может снизить коэффициент трения до 30% (т.е. более «слабые» разрывные зоны).
- Скорость вязкопластической деформации увеличивается с увеличением содержания воды, т.е. влажные минералы (напр., кварц) намного «слабее» сухих.

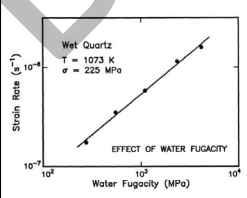


Figure 4. Strain rate versus water fugacity for fine-grained quartzite deformed in the dislocation creep regime using the stress-strain data in Figure 3a of *Kronenberg and Tullis* [1984]. For experiments in which steady state creep was not attained by the end of the run, the steady state flow stress was estimate from an extrapolation of the stress-strain data to a strain of ~25%. Flow stresses were converted to strain rates at a common stress of 225 MPa using a stress exponent of 2.6, the value reported for water-added experiments at a confining pressure of 1500 MPa. For the sample deformed at a confining pressure of 350 MPa, the flow stress exceeded the confining pressure; hence, as noted by Kronenberg and Tullis, optically visible microcracks may have dominated the deformation behavior of this sample.

grained synthetic calcite aggregate [*Walker et al.*, 1990] occurs predominantly by twinning and power law breakdown at higher stresses (>400 MPa at <800°C) and by grain-size dependent diffusional creep at lower stresses and higher temperatures. The coarse-grained Carrara and Yule marbles also deform by twinning and power law breakdown at higher stresses but by power law creep at lower stresses and higher

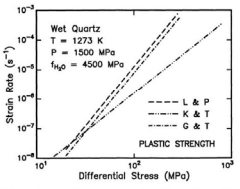
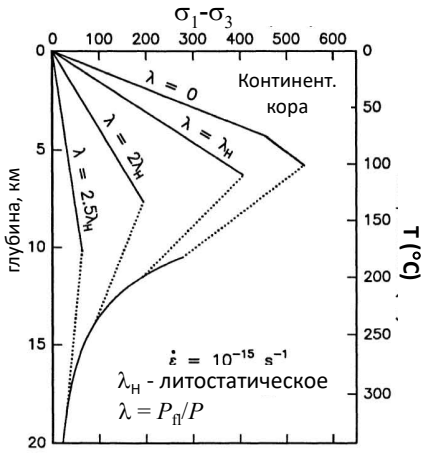


Figure 5. Strain rate versus stress for wet quartzite including rheologies from *Luan and Paterson* [1992], *Kronenberg and Tullis* [1984], and *Gleason and Tullis* [1994]. The data of Luan and Paterson were extrapolated from a fluid pressure of 300 MPa to 1500 MPa using a water fugacity exponent of unity.

Зависимость прочности от содержания воды



46

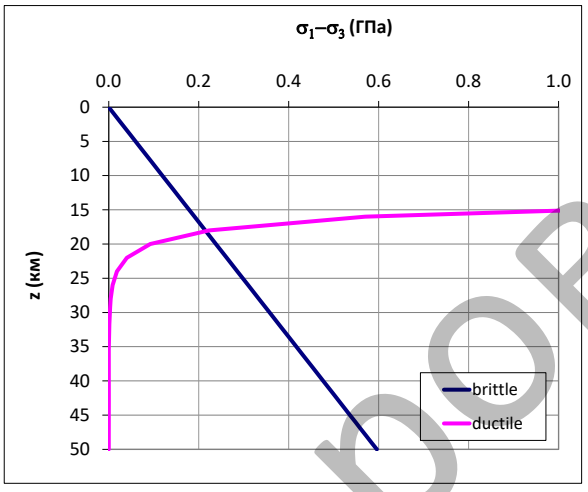
В.С. Захаров

Задача

3.3 Определить глубину перехода от упруго-хрупкого (BD) к нелинейно-вязкому (криповому) механизму разрушения в коре при заданных вещественных параметрах и скорости деформации.

Параметры

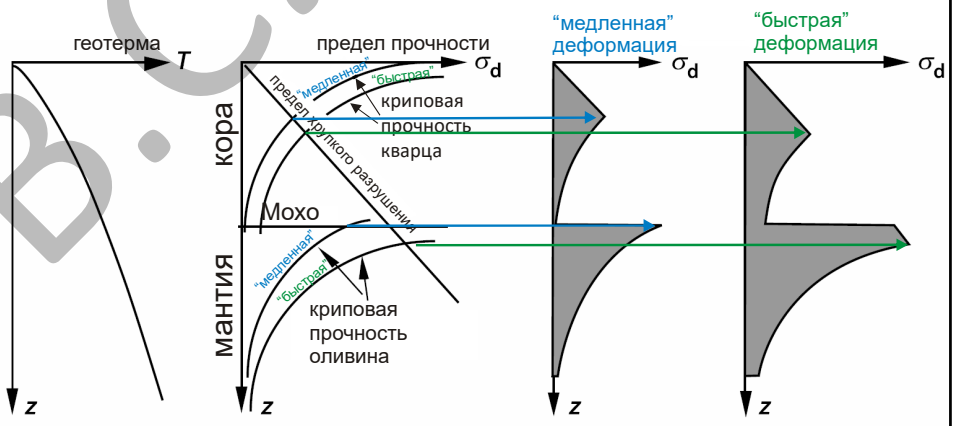
		кора
A	$МПа^{-n} с^{-1}$	0.00032
n		2.3
E	Дж/моль	240000
V	$м^3$/моль	$8 \cdot 10^{-6}$
ε'	1/с	10^{-15}
α		0.5
ρ	$кг/м^3$	2700
λ		0
dT/dz	К/км	6
g	$м/с^2$	9.81
R	Дж/(моль·К)	8.31



47

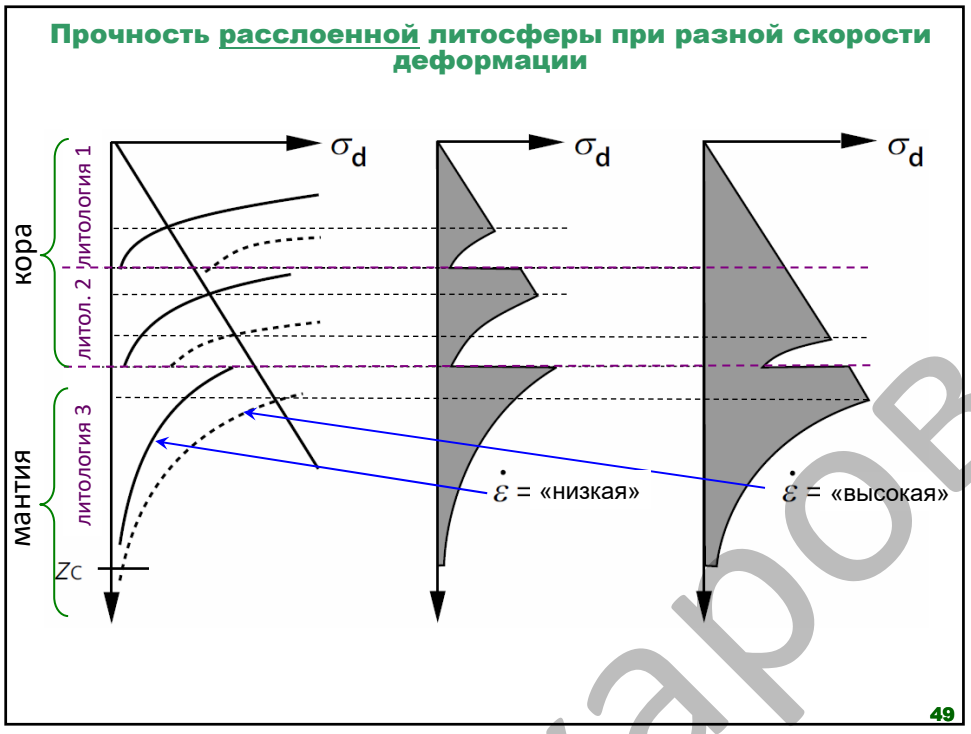
Континентальная литосфера

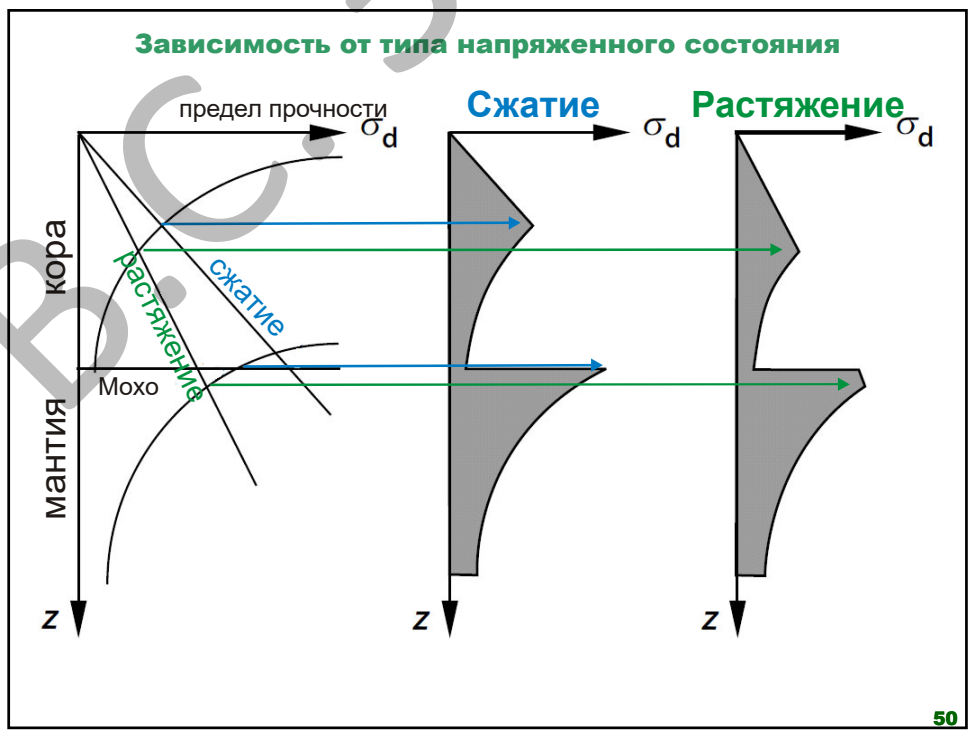
- Зависимость от строения и состава: разный состав коры и мантии → разные параметры в реологическом соотношении для крипа.
- Зависимость от скорости деформации.



48

В.С.Захаров


Прочность расслоенной литосферы при разной скорости деформации
кора
литология 1
литол. 2
мантия
литология 3
Zc
σd
σd
σd
ε̇ = «низкая»
ε̇ = «высокая»
49


Зависимость от типа напряженного состояния
предел прочности
Сжатие
Растяжение
σd
σd
σd
кора
мантия
Moxo
сжатие
растяжение
z
z
z
50

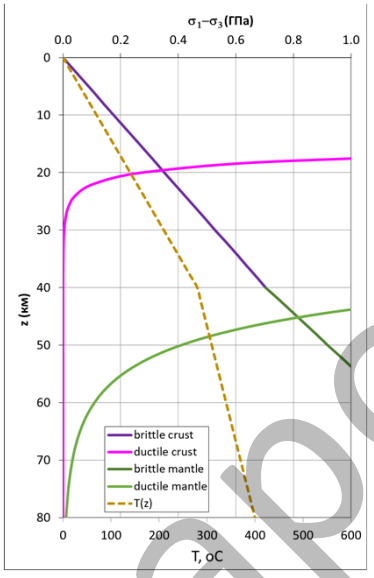
В.С. Захаров

Задача

3.4 Построить кривую прочности и определить глубину перехода от упруго-хрупкого (BD) к нелинейно-вязкому стилю разрушения в коре и мантии при заданных вещественных параметрах и скорости деформации.

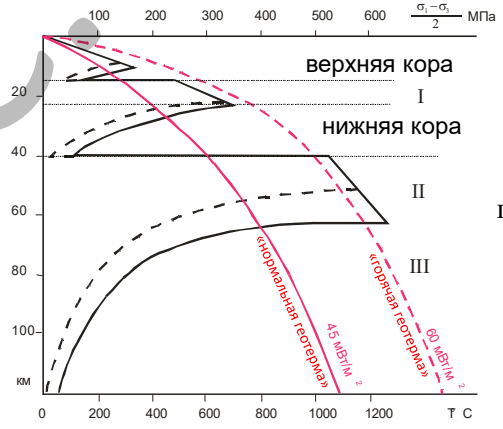
Параметры

		кора	мантия
A	МПа$^{-n}$ с$^{-1}$	0.000316	25119
n		2.3	3.5
E	Дж/моль	240000	532000
V	м3/моль	8.0E-06	1.5E-05
ε'	1/с	1.0E-15	1.0E-15
α	сброс	0.7	
ρ	кг/м3	2700	3300
λ		0.05	0.05
dT/dz	К/км	7	3
g	м/с2	9.81	
R	Дж/(моль·К)	8.31	
H	м	40000	



51

Прочность расслоенной континентальной литосферы для разных тепловых режимах



при $\dot{\varepsilon} = 10^{-15}\, c^{-1}$

I – кора (верхняя и нижняя),
II – подкоровая упруго-хрупкая литосфера,
III – неупругая литосфера.

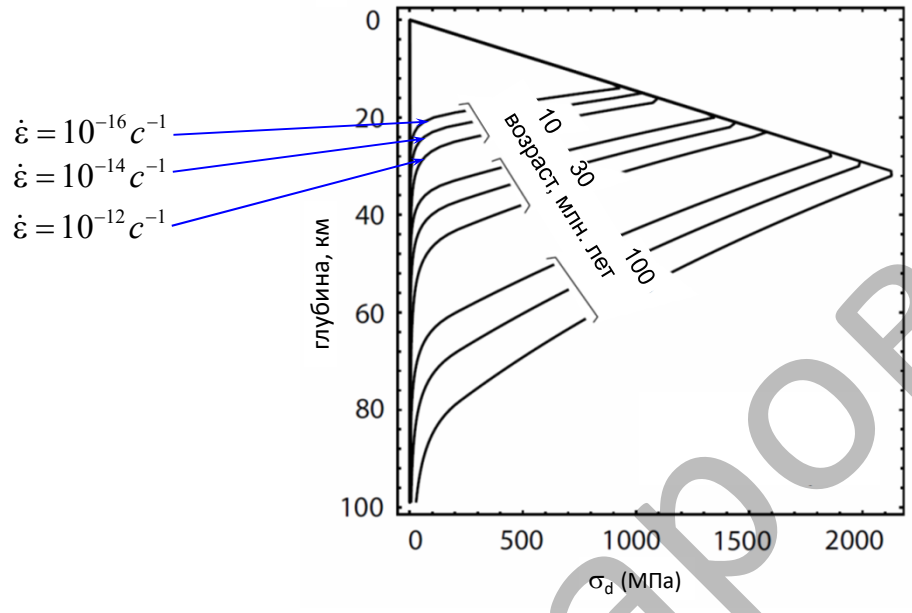
[Cloetingh, Burov, 1996]

53

В.С. Захаров

Прочность океанической литосферы

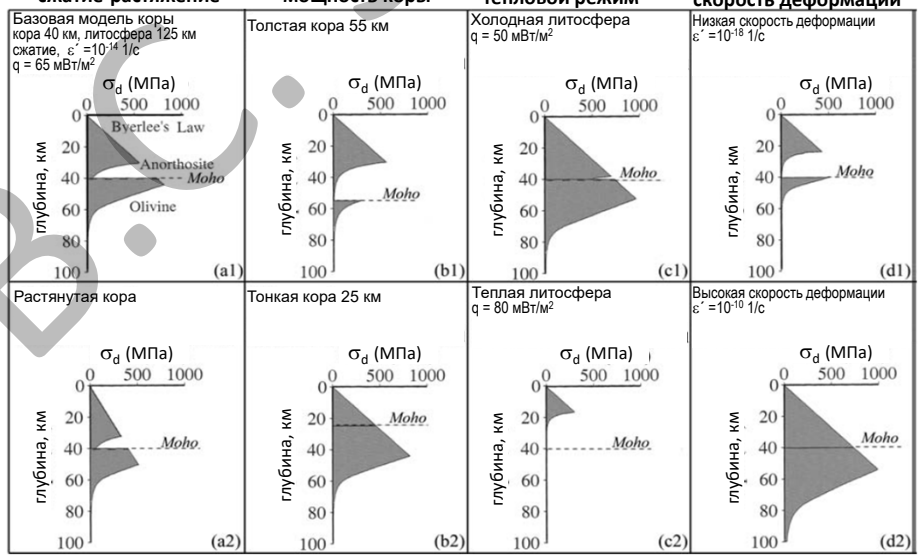
для разной скорости деформации и возраста



54

Обобщение: кривые прочности литосферы для разных условий

сжатие-растяжение	мощность коры	тепловой режим	скорость деформации



Реологическое состояние и расслоение литосферы зависят от:

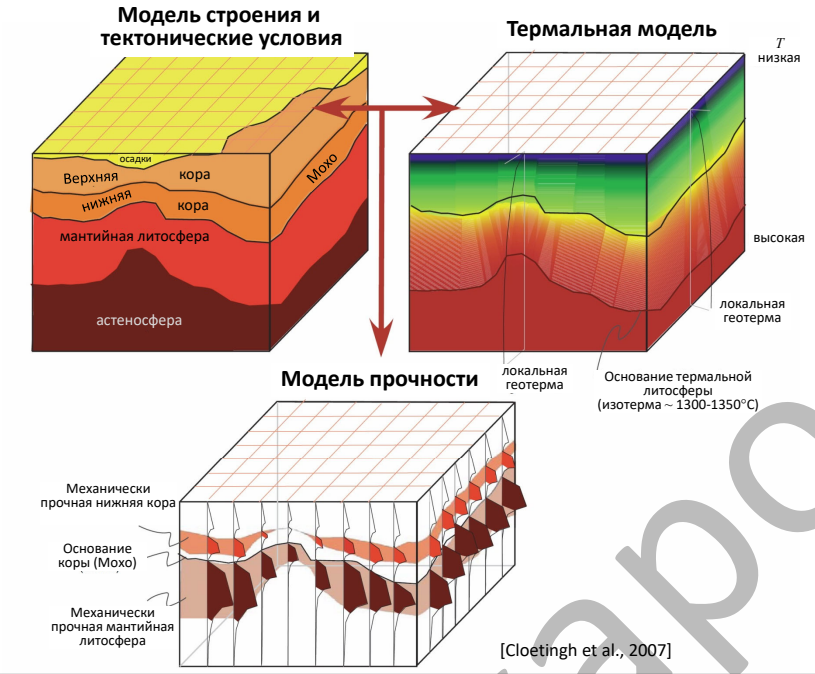
- строения и состава,
- теплового режима,
- условий нагружения (сжатие-растяжение, быстрая–медленная деформация)

и могут меняться в разных тектонических обстановках

55

В.С. Захаров

Обобщение: построение модели прочности литосферы

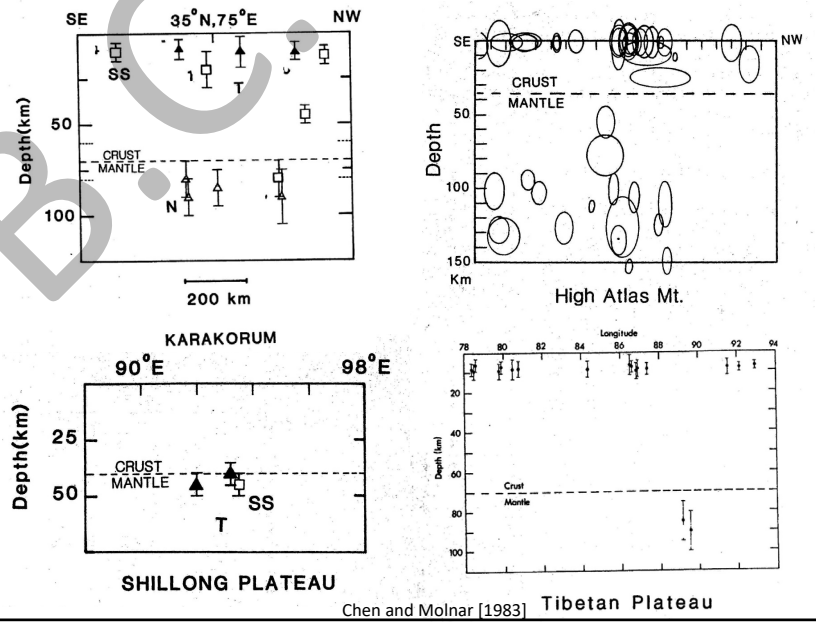


[Cloetingh et al., 2007]

56

Доп. сведения о реологии по сейсмическим данным

сейсмогенная верхняя кора и подкоровая литосфера, асейсмичная нижняя кора

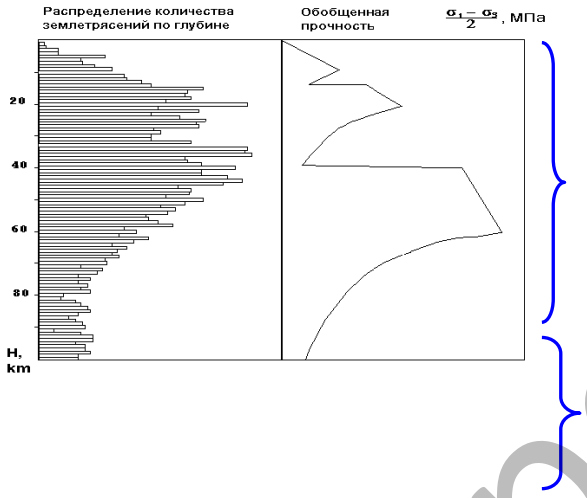


Chen and Molnar [1983]

57

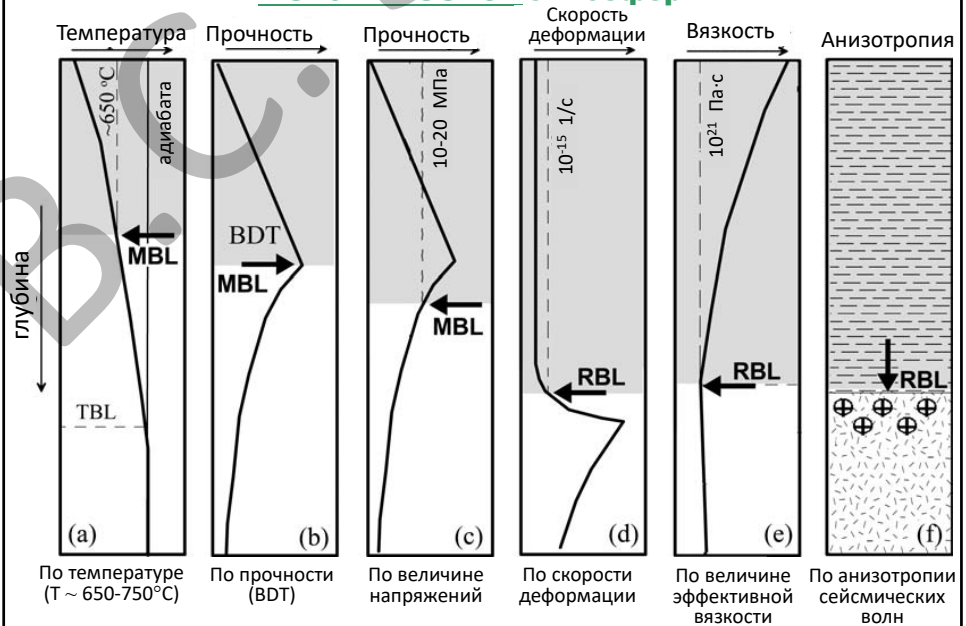
В.С. Захаров

Кривая прочности и распределение количества землетрясений по глубине



58

Возможные определения мощности механической литосферы



59

В.С. Захаров

Резюме для реологии Земли

Реологическое поведение вещества Земли
зависит от
- Строения и состава,
- P-T условий,
- Условий воздействия (скорость, характер, масштаб)

и может **проявляться по-разному:**
упругость - хрупкость – пластичность - вязкость (по разным механизмам)

61

В.С. Захаров