

Введение в физику гидросферы

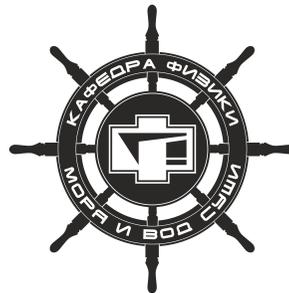
2026 Лекция №1

Носов Михаил Александрович

кафедра физики моря и вод суши

отделение геофизики

физический факультет МГУ имени М.В.Ломоносова



Элементы гидросферы Земли (определение понятий)

Гидросфера — прерывистая водная оболочка Земли, располагающаяся между атмосферой и твёрдой земной корой (литосферой) и представляющая собой совокупность океанов, морей и поверхностных вод суши.

В более широком смысле в состав гидросферы включают также подземные воды, лёд и снег Арктики и Антарктики, а также атмосферную воду и воду, содержащуюся в живых организмах.

Общая масса воды в гидросфере $1.46 \cdot 10^{21}$ кг

Масса Земли $5.98 \cdot 10^{24}$ кг

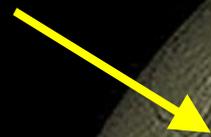
Масса атмосферы (сухого воздуха) $5.14 \cdot 10^{18}$ кг

Распределение воды по основным объектам

<i>объект</i>	<i>объем, км³</i>	<i>%</i>
Океаны и моря	1 338 000 000	96.5
Полярные льды, ледники и снег	24 064 000	1.74
Грунтовые воды	23 400 000	1.69
Влага в почве	16 500	0.001
Подземный лед и вечная мерзлота	300 000	0.022
Озера	176 400	0.013
Атмосфера	12 900	0.001
Болота	11 470	0.0008
Реки	2 120	0.0002
Вода в организмах	1 120	0.0001

[Shiklomanov, I. A., & Gleick, P. H. (1993). Water in crisis. Water in Crisis, 13-24]

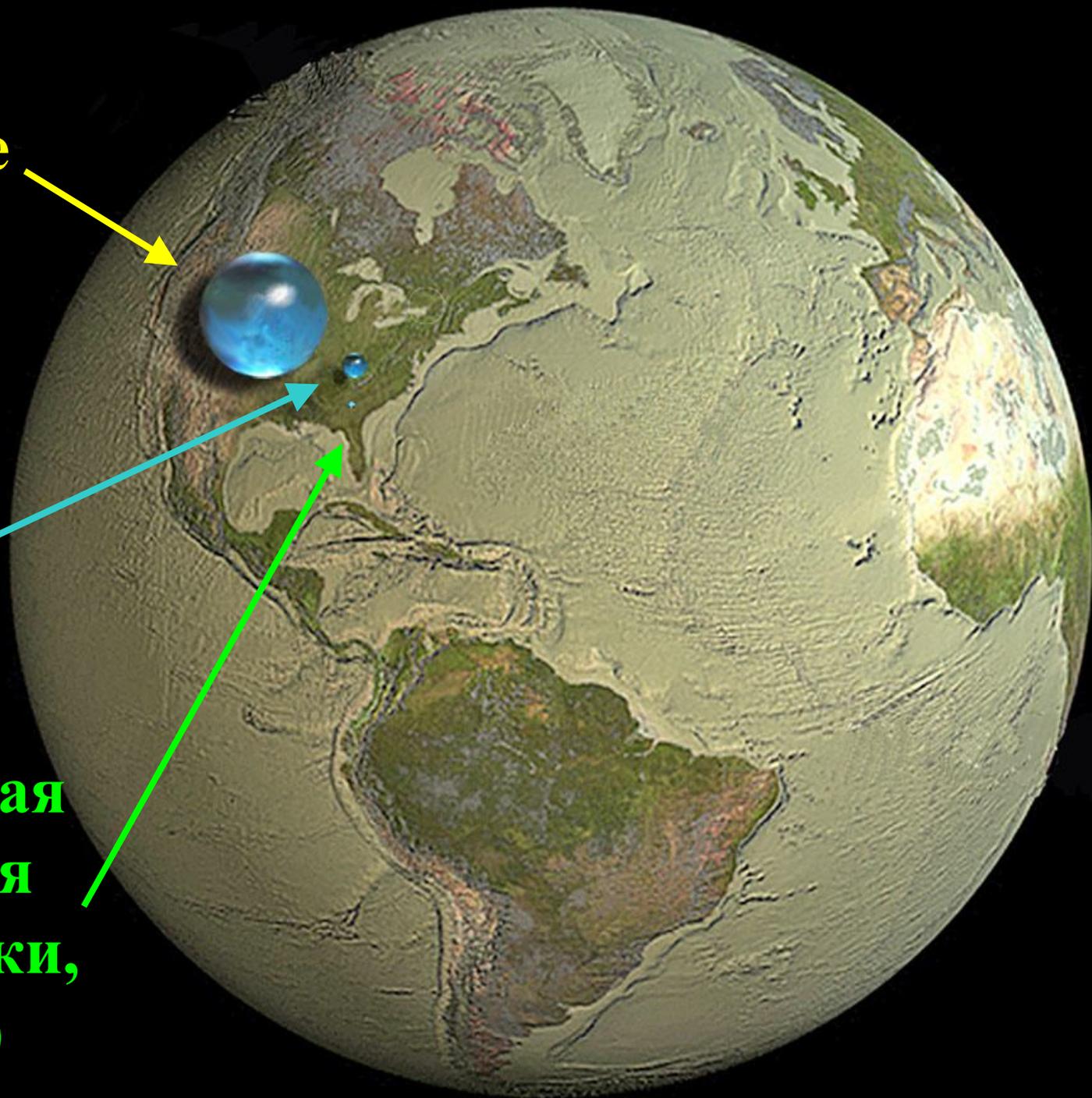
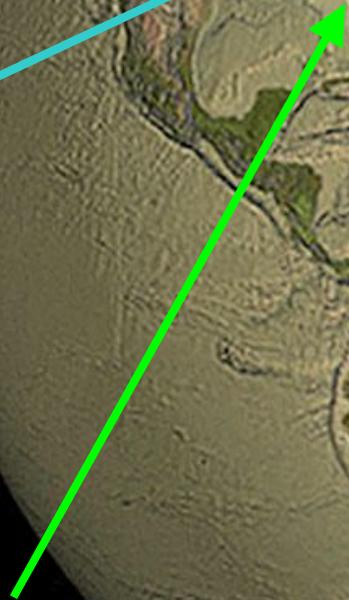
**вся вода
на Земле**



**пресная
вода**



**доступная
пресная
вода (реки,
озера)**



Гидросфера — прерывистая водная оболочка Земли, располагающаяся между атмосферой и твёрдой земной корой (литосферой) и представляющая собой совокупность океанов, морей и поверхностных вод суши.

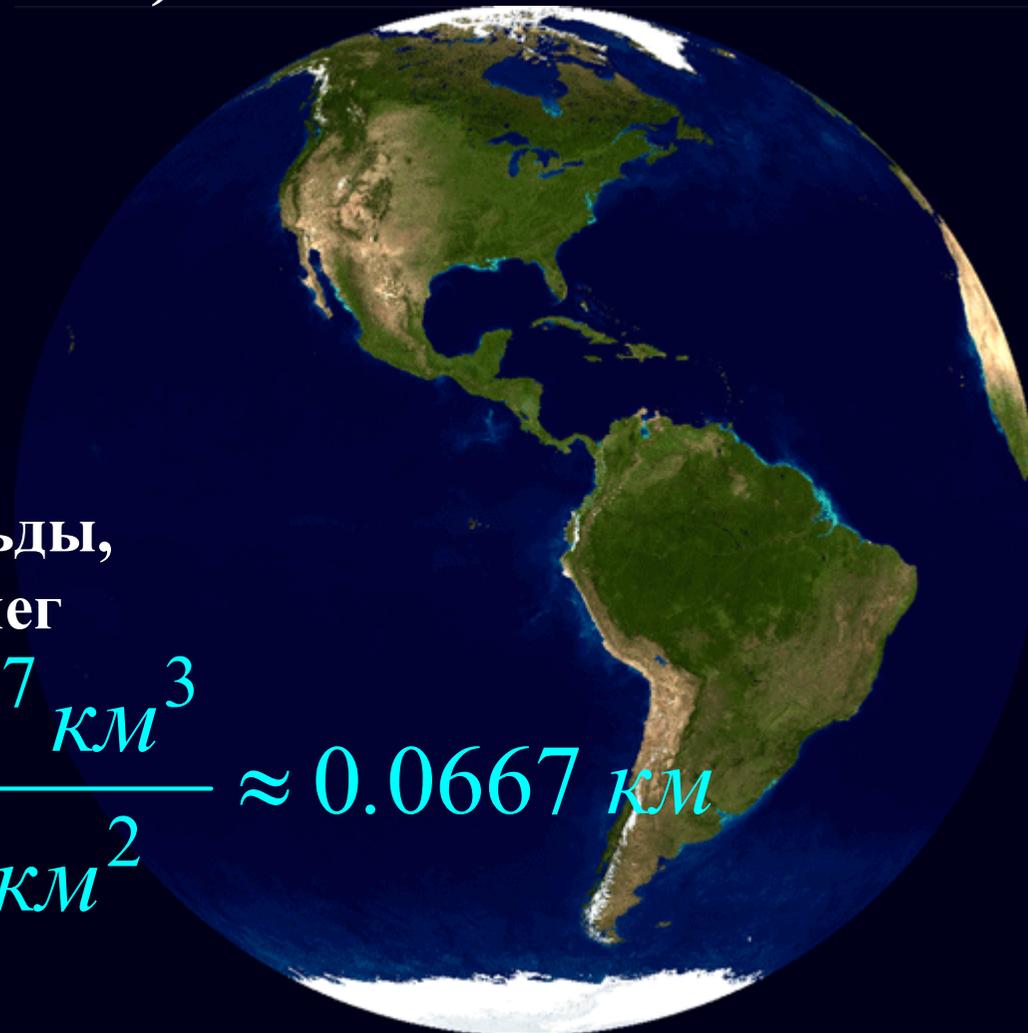
В более широком смысле в состав гидросферы включают также подземные воды, лёд и снег Арктики и Антарктики, а также атмосферную воду и воду, содержащуюся в живых организмах.

Океан (Мировой океан) — непрерывная водная оболочка Земли, окружающая материки и острова и обладающая общностью солевого состава.

Мировой океан
занимает 71%
поверхности Земли
(361 млн.кв.км)

моря и океаны

$$\frac{1.338 \cdot 10^9 \text{ км}^3}{3.61 \cdot 10^8 \text{ км}^2} \approx 3.7 \text{ км}$$



Полярные льды,
ледники и снег

$$\frac{2.4064 \cdot 10^7 \text{ км}^3}{3.61 \cdot 10^8 \text{ км}^2} \approx 0.0667 \text{ км}$$

**Гипотезы о
происхождении
атмосферы и
гидросферы
Земли**

Ингредиенты Солнечной системы

металлы

и

силикаты

0.6%

легкие газы

и

льды

99.4%

Масса гидросферы и атмосферы

Масса Земли

$\approx 0.025\%$

Общая масса воды в гидросфере $1.46 \cdot 10^{21}$ кг

Масса Земли $5.98 \cdot 10^{24}$ кг

Масса атмосферы (сухого воздуха) $5.14 \cdot 10^{18}$ кг

Гипотеза 1

Атмосфера была захвачена из протопланетного облака в процессе аккреции

Основания для сомнений...

- 1. Летучие элементы не могли быть удержаны в зоне формирования планет земной группы из-за высокой температуры в этой области протопланетного диска**
- 2. Выметание первичных атмосфер солнечным ветром молодого Солнца**
- 3. Потеря атмосферы при бомбардировке крупными телами**

Гипотеза 2 (современная концепция)

Атмосфера и гидросфера Земли образовались около 4 млрд. лет назад в результате дегазации мантии. Первичная атмосфера состояла из H_2O , CO_2 и др. газов (H_2 , N_2 , CH_4 , CO , H_2S , NH_3 , HF , HCl , Ar)

- O_2 отсутствовал**
- земное вещество сильно обеднено летучими и подвижными элементами и соединениями, в противном случае атмосфера и гидросфера были бы более мощными**

Гипотеза 2 (современная концепция)

Атмосфера и гидросфера Земли образовались около 4 млрд. лет назад в результате дегазации мантии. Первичная атмосфера состояла из H_2O , CO_2 и др. газов (H_2 , N_2 , CH_4 , CO , H_2S , NH_3 , HF , HCl , Ar)

Эксперимент «Царев-2» (ИДГ РАН)

СВЧ нагрев в вакууме метеоритного образца (обыкновен. хондрит класса L)

Выделяются: H_2 , N_2 , CH_4 , CO , H_2O , etc.

Гипотеза 2 (современная концепция)

«Судьба» основных соединений:

H_2O – гидросфера, атмосфера, ...

CO_2 – большая часть связана в горных породах и органическом веществе

N_2 – органическое вещество, осадочные породы, современная атмосфера

O_2 – в заметном количестве появился 1.5 млрд. лет назад, источники: **фотосинтез** (по мере развития жизни), фотодиссоциация пара

Гипотеза 3 (современная концепция)

**Атмосфера и гидросфера
сформировались в результате
интенсивной бомбардировки кометами
и астероидами из внешних областей
Солнечной системы на ранних этапах
ЭВОЛЮЦИИ**

**[Шмидт, 1957; Герасимов, 1985;
Ипатов, 2000; Маров, 2005;
Genda&Abe, 2003; Кораблев, 2005]**

**Условия
существования
атмосферы и
гидросферы**

Условие существования атмосферы

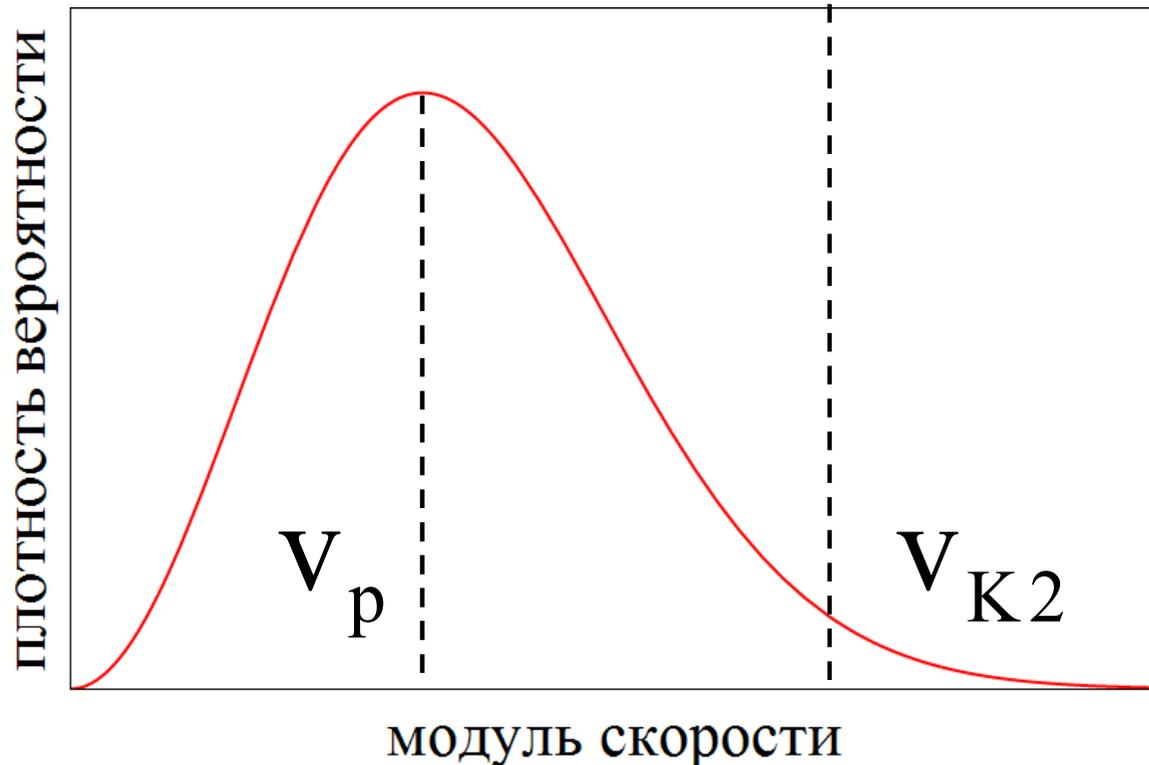
скорость тепл. движения < 2-й косм. скорости

$$V_{K2} = \sqrt{\frac{2GM_{\oplus}}{R_{\oplus}}} \approx \sqrt{2gR_{\oplus}} \approx 11.2 \text{ км/с}$$

Распределение Максвелла

наиболее
вероятная
тепловая
скорость

$$V_p = \sqrt{\frac{2kT}{m}}$$



Диссипация атмосфер – ускользание газов из атмосфер космических тел, вызванное тепловым движением атомов и молекул

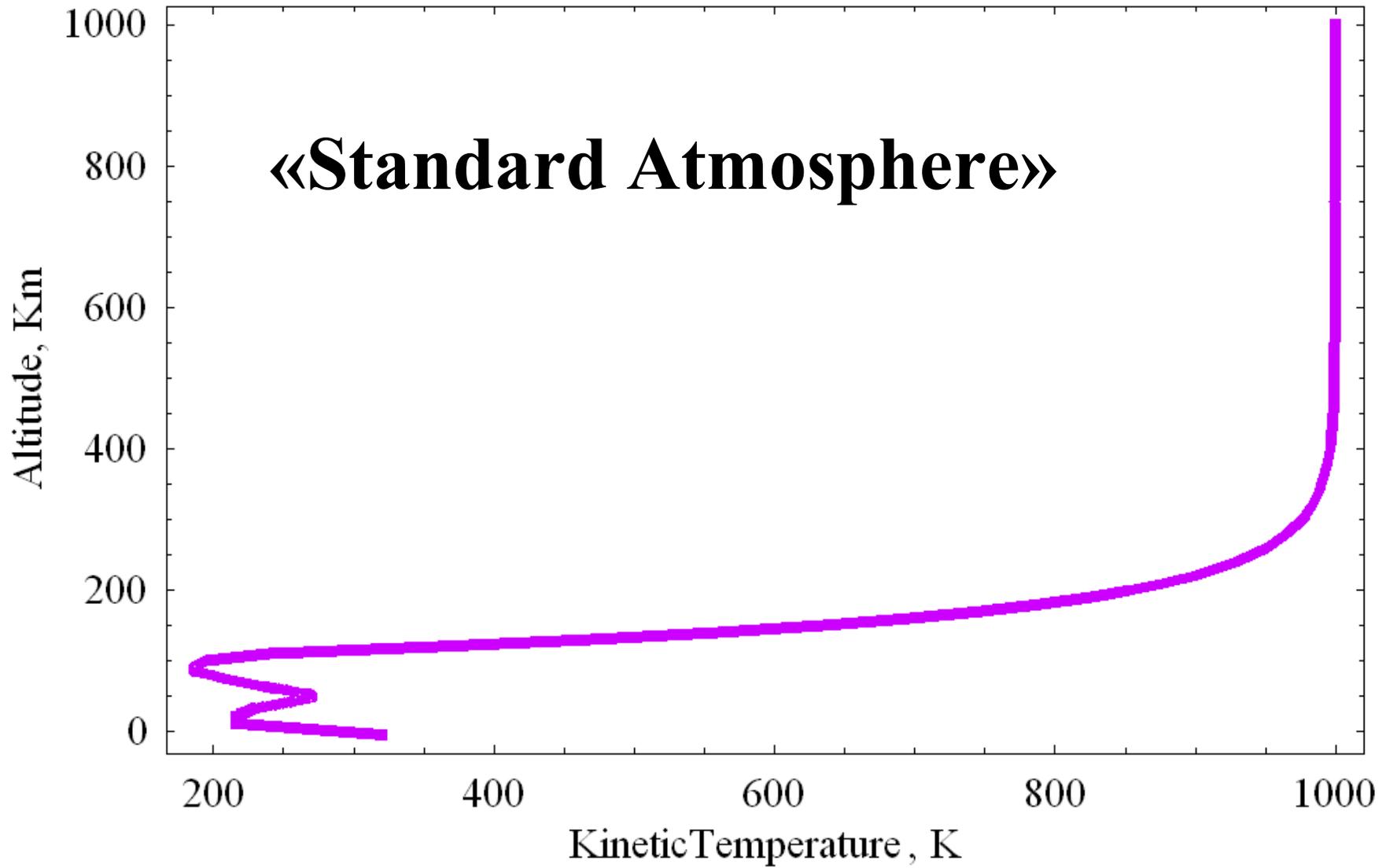
$$v_p < v_{K2}$$

условие не обеспечивает отсутствие диссипации

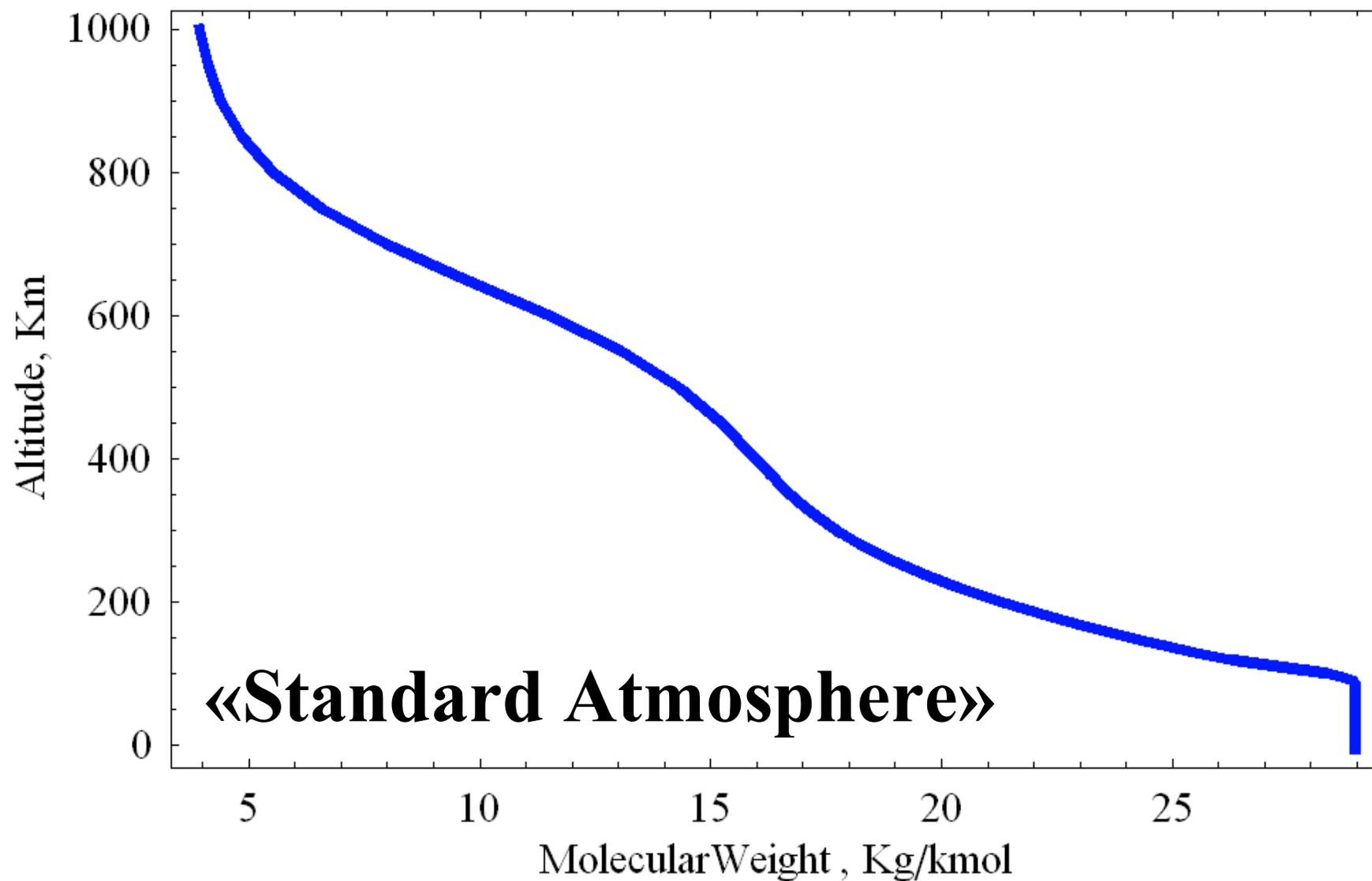
при $T = 300 \text{ K}$

$$\left. \begin{array}{l} v_{\text{H}_2} \approx 1.5 \text{ км/с} \\ v_{\text{N}_2} \approx 0.5 \text{ км/с} \end{array} \right\} < 11.2 \text{ км/с}$$

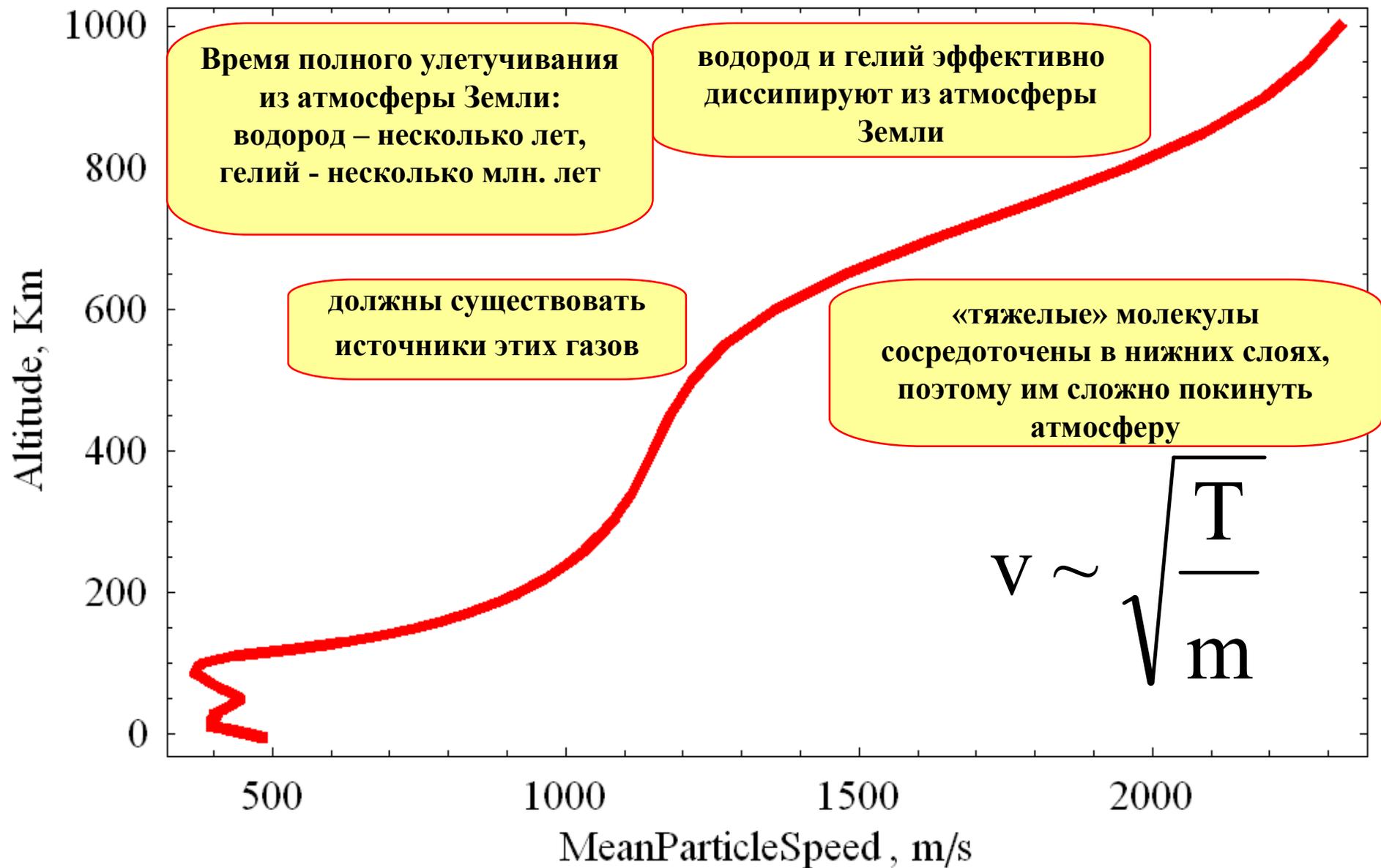
Зависимость температуры воздуха от высоты



Зависимость среднего молекулярного веса от высоты



Зависимость средней скорости от высоты



Состав атмосферы

**ПОСТОЯННЫЕ
КОМПОНЕНТЫ**

**переменные
КОМПОНЕНТЫ**

	% объема		% объема
Азот	78.11	Вода	0 – 7
Кислород	20.957	CO₂	0.01 – 0.1
Аргон	0.937	Озон	0 – 0.01

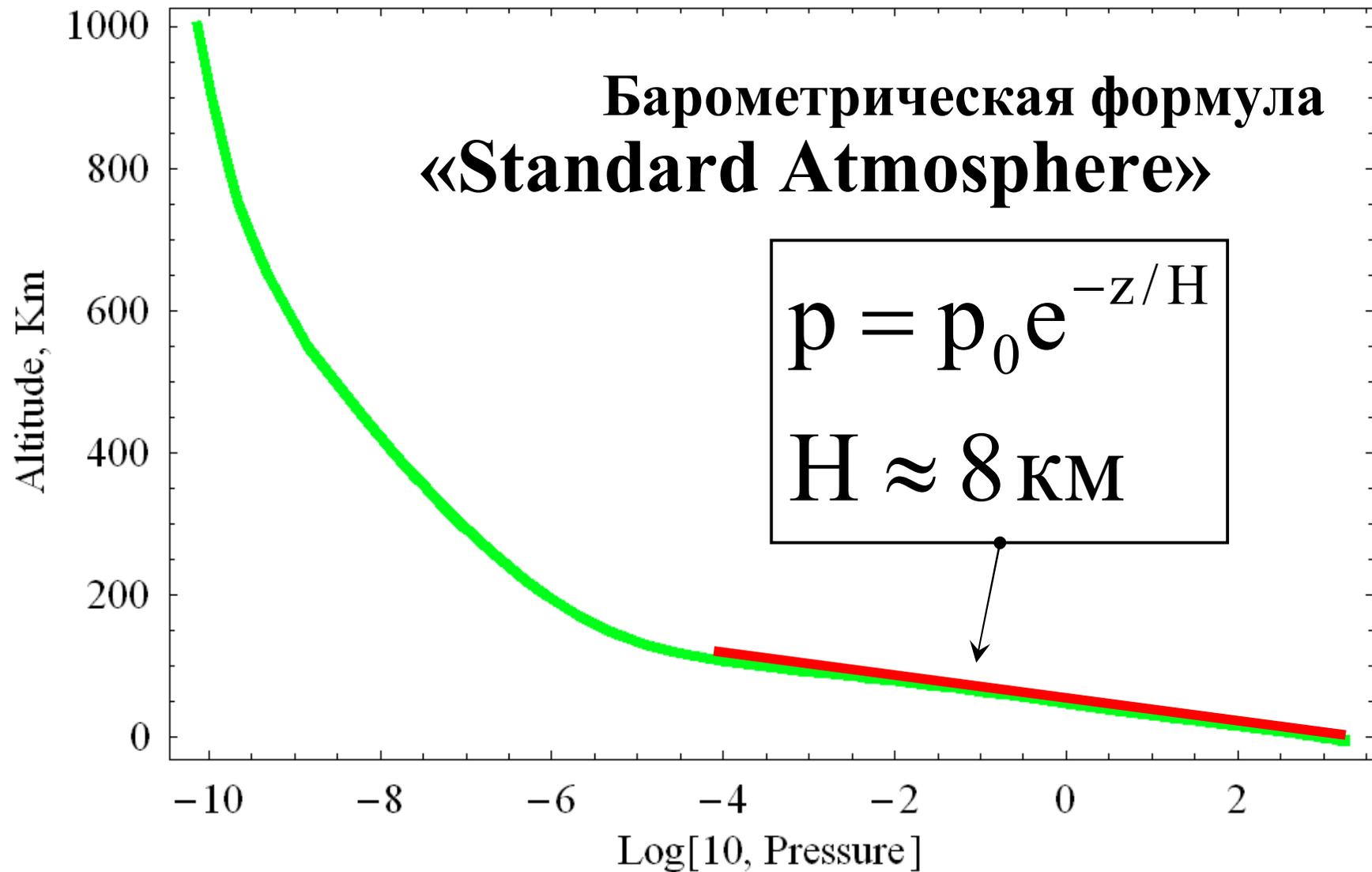
Постоянные компоненты воздуха

Компонента	Формула	Относительная молекулярная масса	% объема
Азот	N₂	28.016	78.110
Кислород	O₂	31.9986	20.957
Аргон	Ar	39.942	0.937
Неон	Ne	20.182	0.001818
Гелий	He	4.003	0.000524
Криптон	Kr	83.80	0.000114
Ксенон	Xe	131.3	0.0000087
Водород	H ₂	2.016	0.00005
Метан	CH ₄	18.043	0.0002
Закись азота	N ₂ O	44.015	0.00005

Переменные компоненты воздуха

Компонента	Формула	Относительная молекулярная масса	% объема
Вода	H_2O	18.005	0 – 7
Двуокись углерода	CO_2	44.009	0.01 – 0.1 у пов-ти среднее 0.032
Озон	O_3	47.998	0 – 0.01
Двуокись серы	SO_2	64.064	0 – 0.0001
Двуокись азота	NO_2	46.007	0 – 0.000002

Зависимость давления воздуха от высоты



Условия существования гидросферы (океана)

- 1. Температура на планете должна быть выше температуры плавления вещества, из которого состоит океан**
- 2. Парциальное давление газообразной фазы этого вещества должно быть выше насыщающего давления**
- 3. Температура и давление должны быть ниже критической точки (для воды: 647.3К, 22.12МПа)**

Точка, в которой фазы вещества становятся тождественными: обращаются в ноль теплота фазового перехода и поверхн. натяжение

Фазовая диаграмма воды

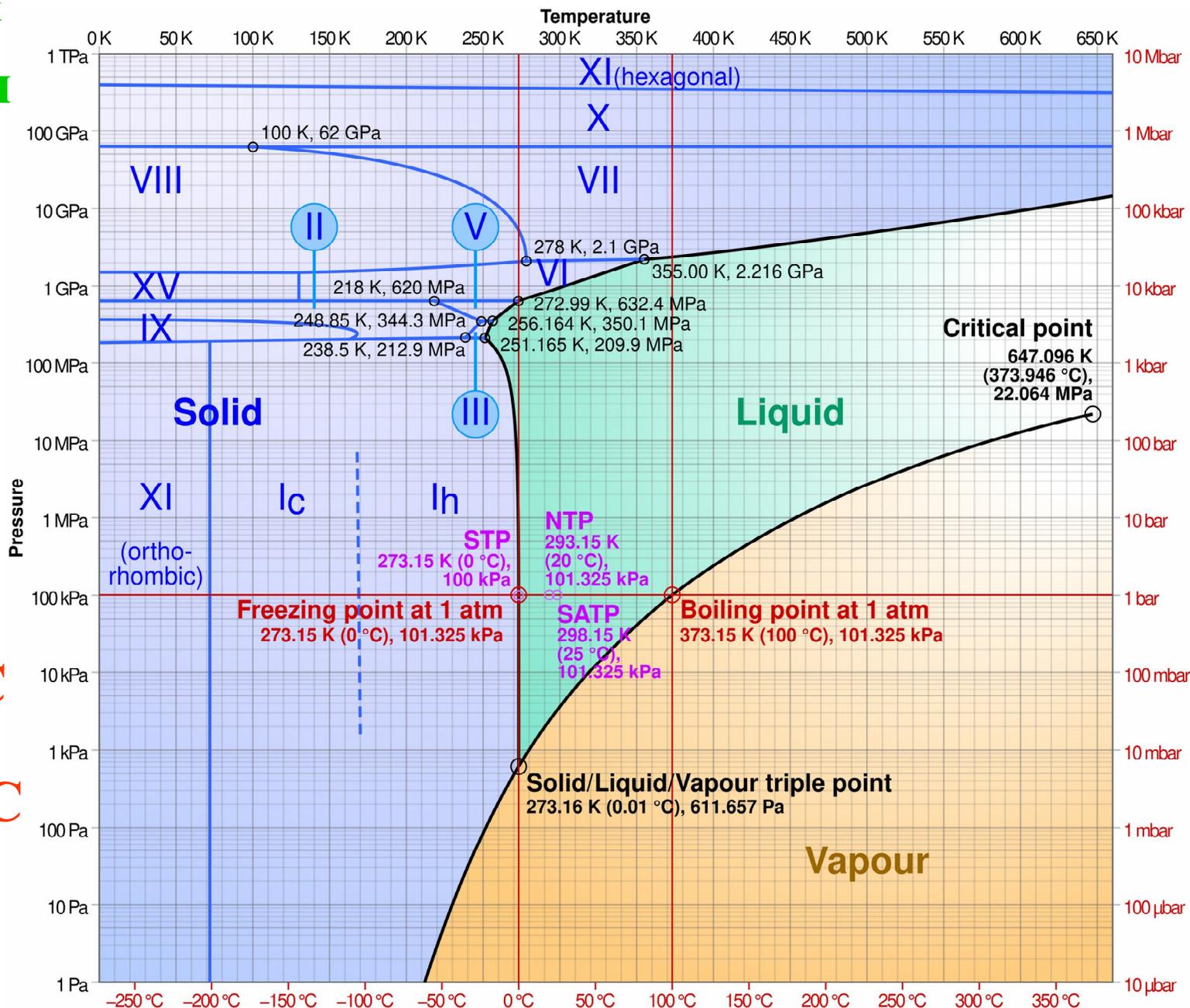
$$p_b = \rho g H_{\max}$$

$$H_{\max} \approx 11 \text{ км}$$

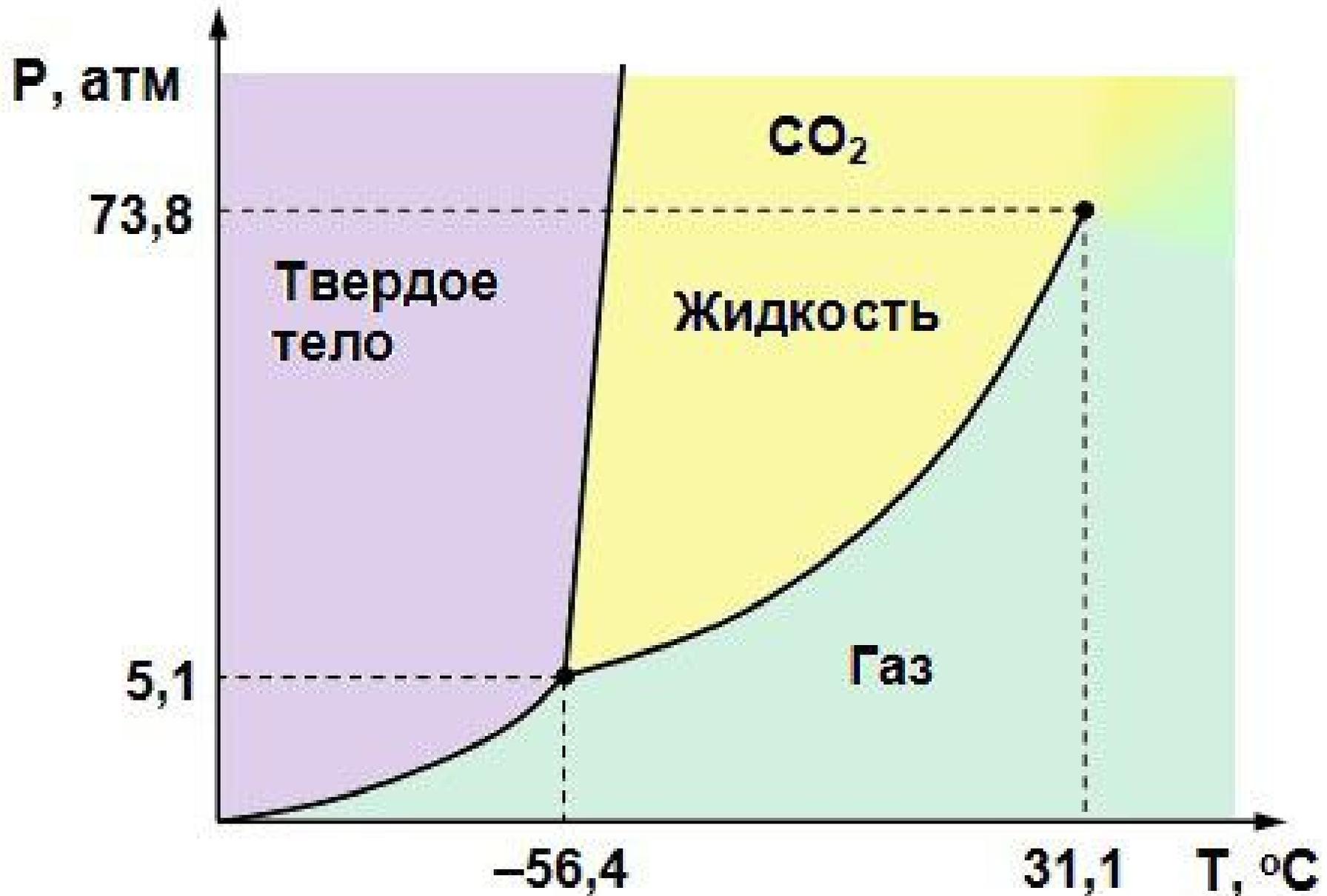
$$p_b \sim 10^8 \text{ Па}$$

$$T_{\min} \approx -90^\circ\text{C}$$

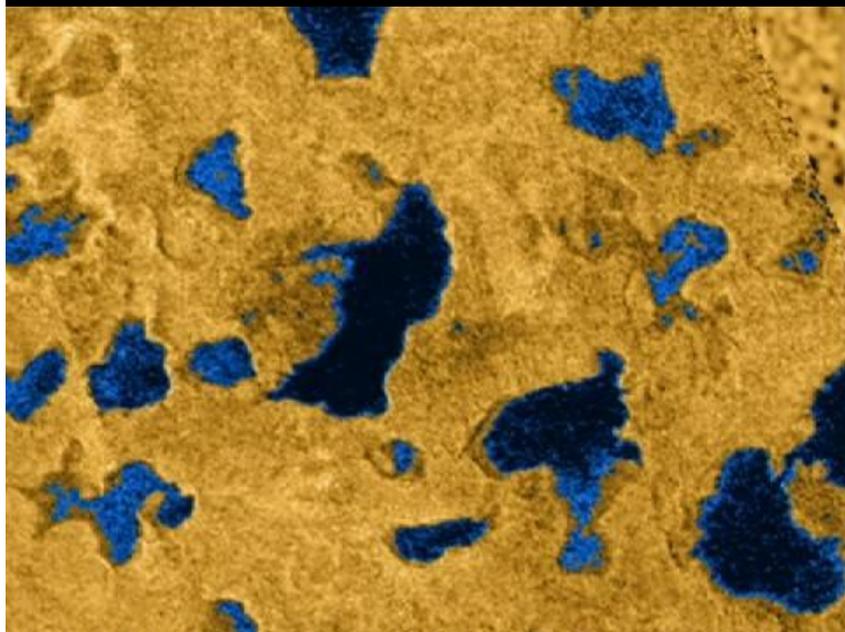
$$T_{\max} \approx 400^\circ\text{C}$$



Фазовая диаграмма углекислоты



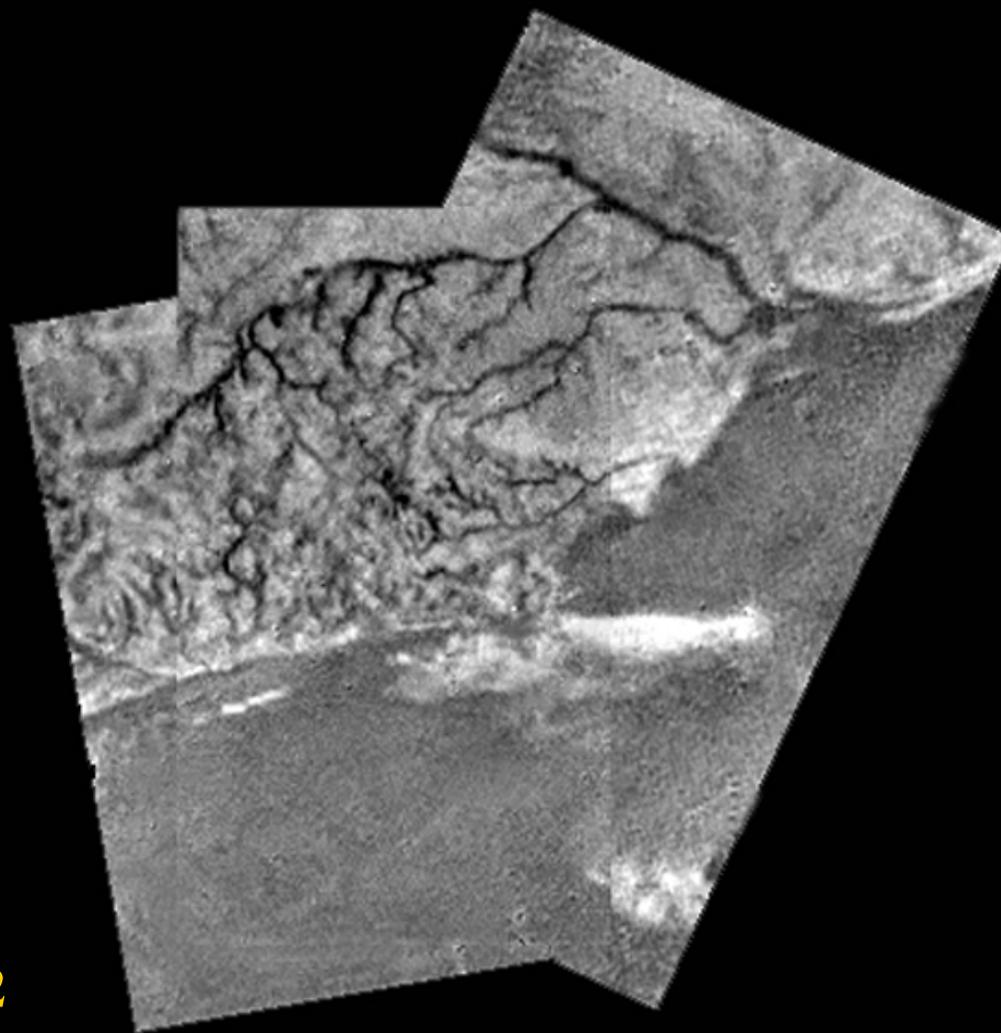
Титан (спутник Сатурна)



Озера (этан,
пропан, метан)

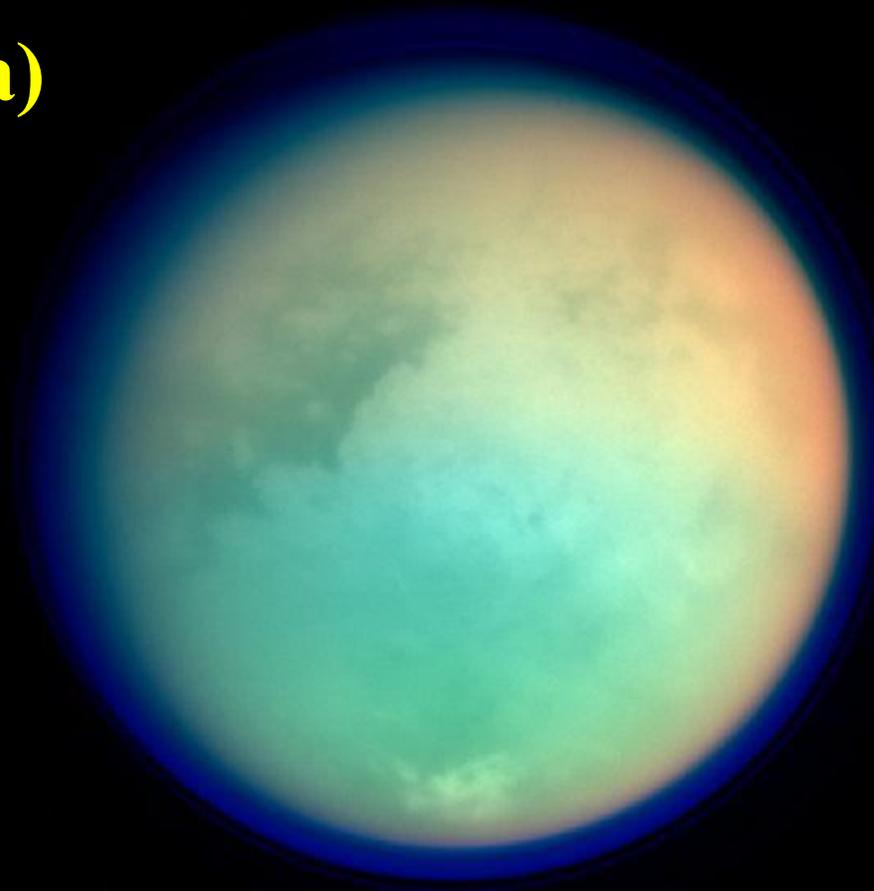
$T=94\text{ К}$ $g=1.35\text{ м/с}^2$

$p=1.45\text{ атм}$



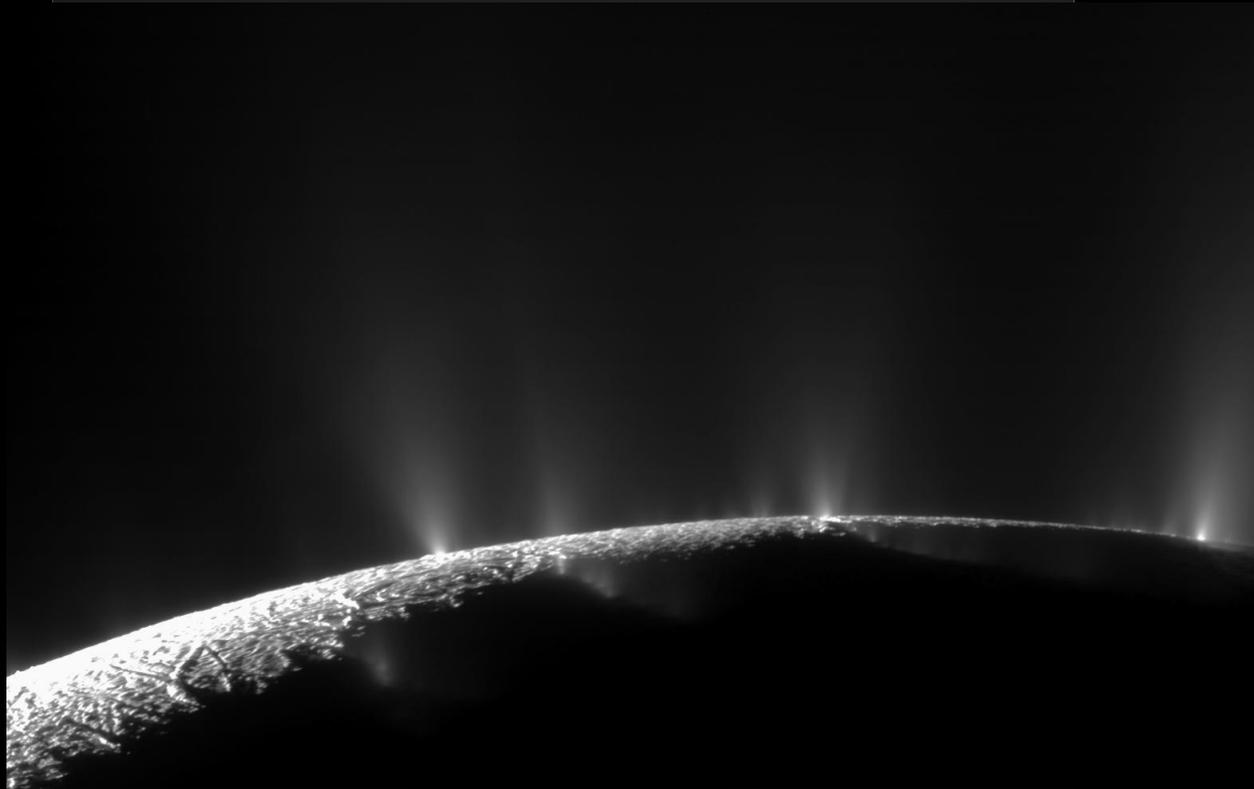
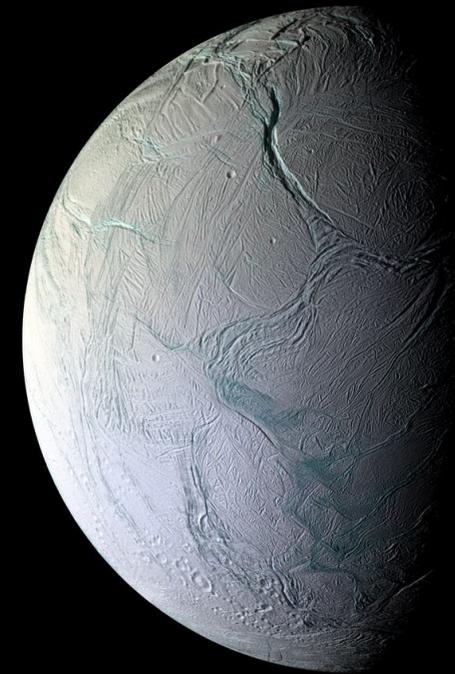
Русла рек

Титан (спутник Сатурна)



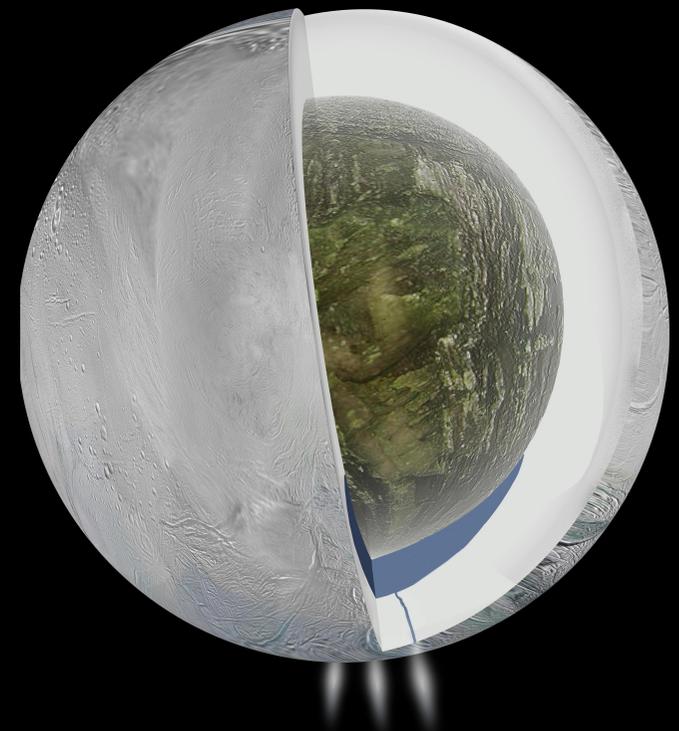
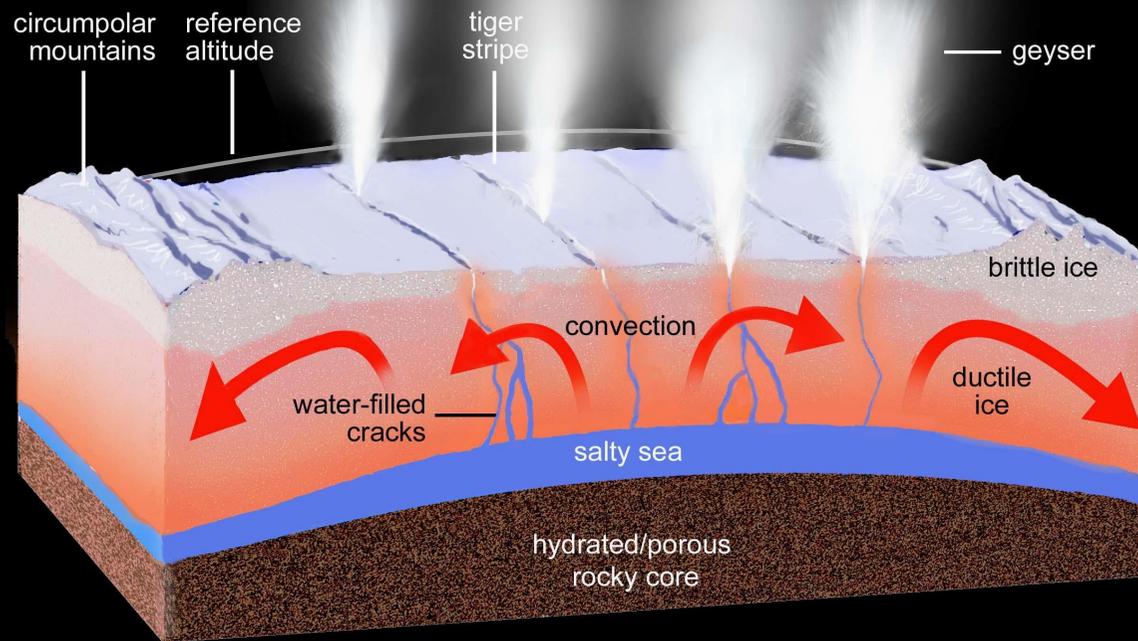
Ландшафт Титана в месте посадки зонда «Гюйгенс» (2005 г.). Камни округлой формы могли образоваться при воздействии жидкости.

Энцелад (спутник Сатурна)



Гейзеры на южном полюсе

Энцелад (спутник Сатурна)



Гейзеры на южном полюсе

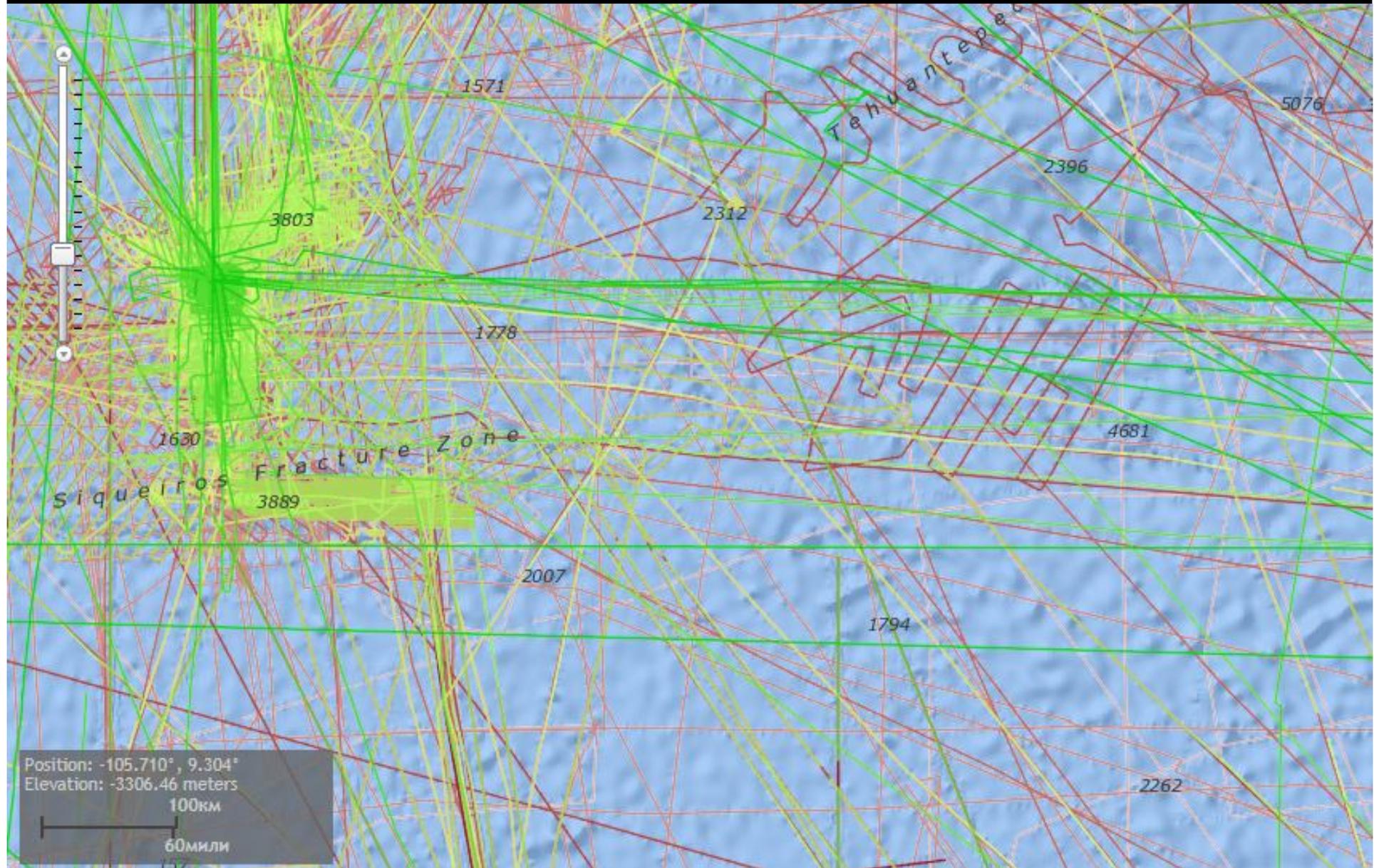
- Вода (водяной пар) появилась на поверхности Земли 4 млрд.лет назад как следствие дегазации мантии при тектономагматической активности (и/или бомбардировки кометами и астероидами из внешних областей Солнечной системы)**
- Гидросфера (океан) возникла на Земле 3 млрд. лет назад**
- Современные океанские котловины сформировались значительно позднее (в последние 250 млн. лет)**

Топография океанического дна

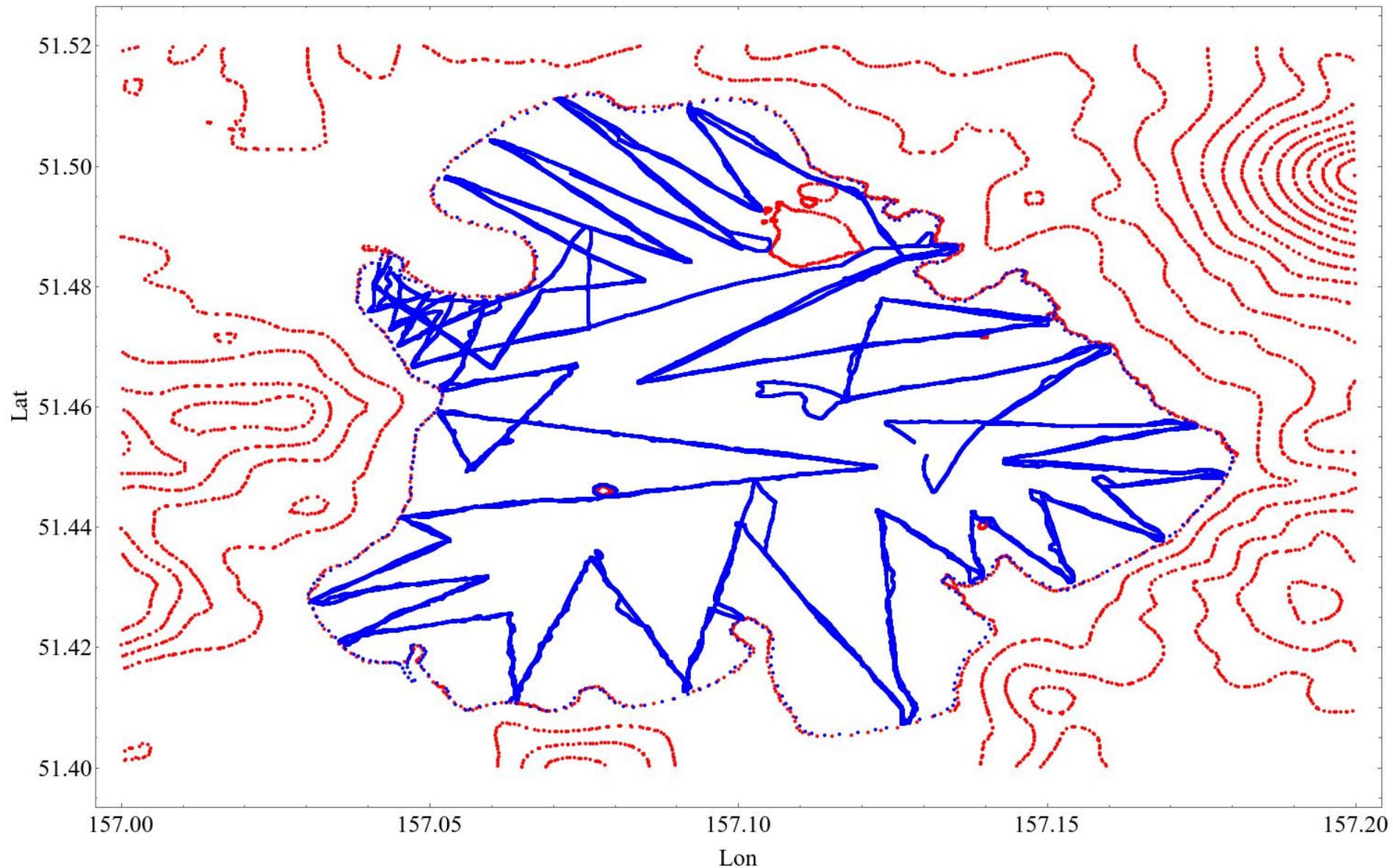


съемка однолучевым и многолучевым (зеленые треки) эхолотом

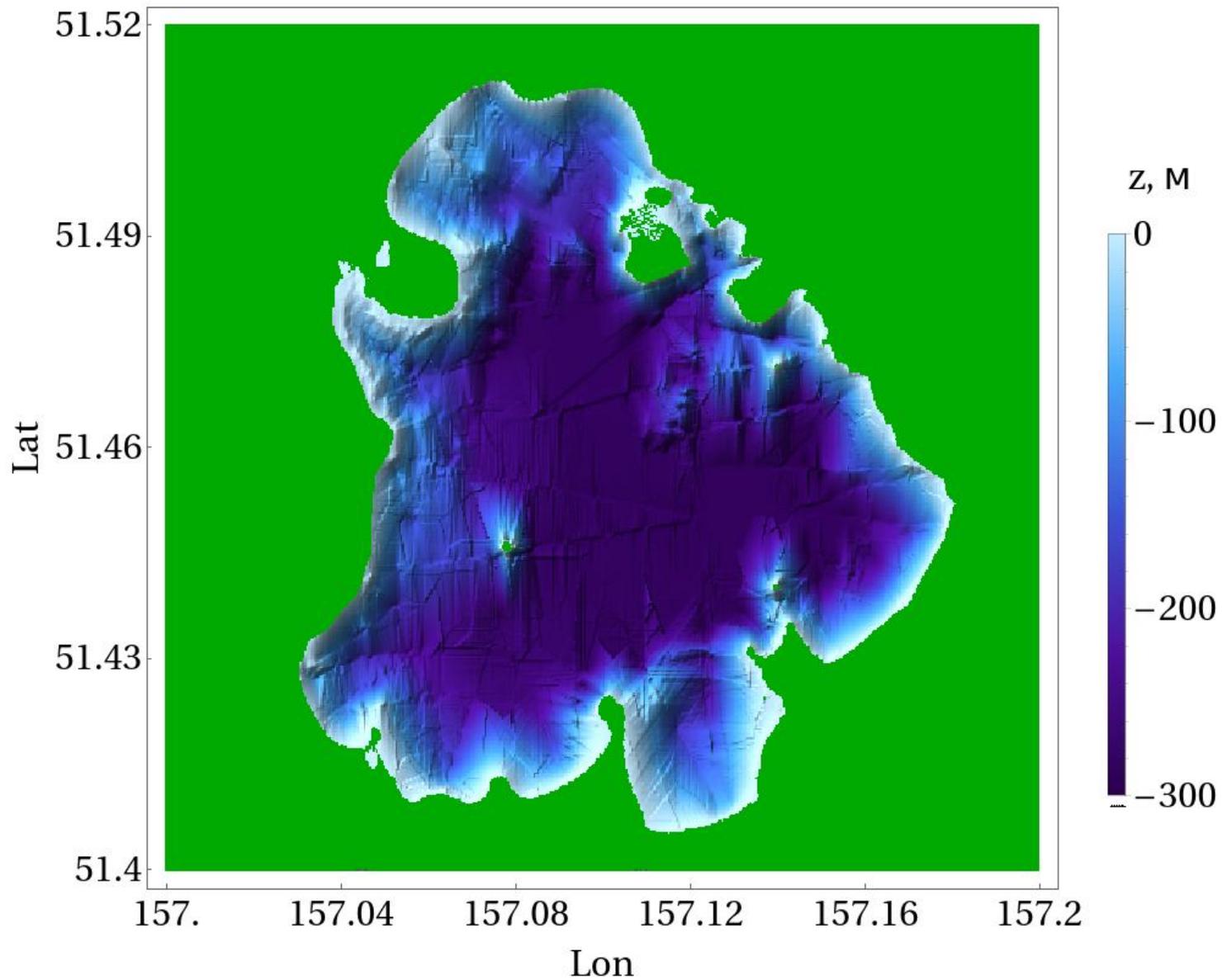
Топография океанического дна



Пример батиметрической съемки 2017 г. (Курильское озеро)



Батиметрия Курильского озера



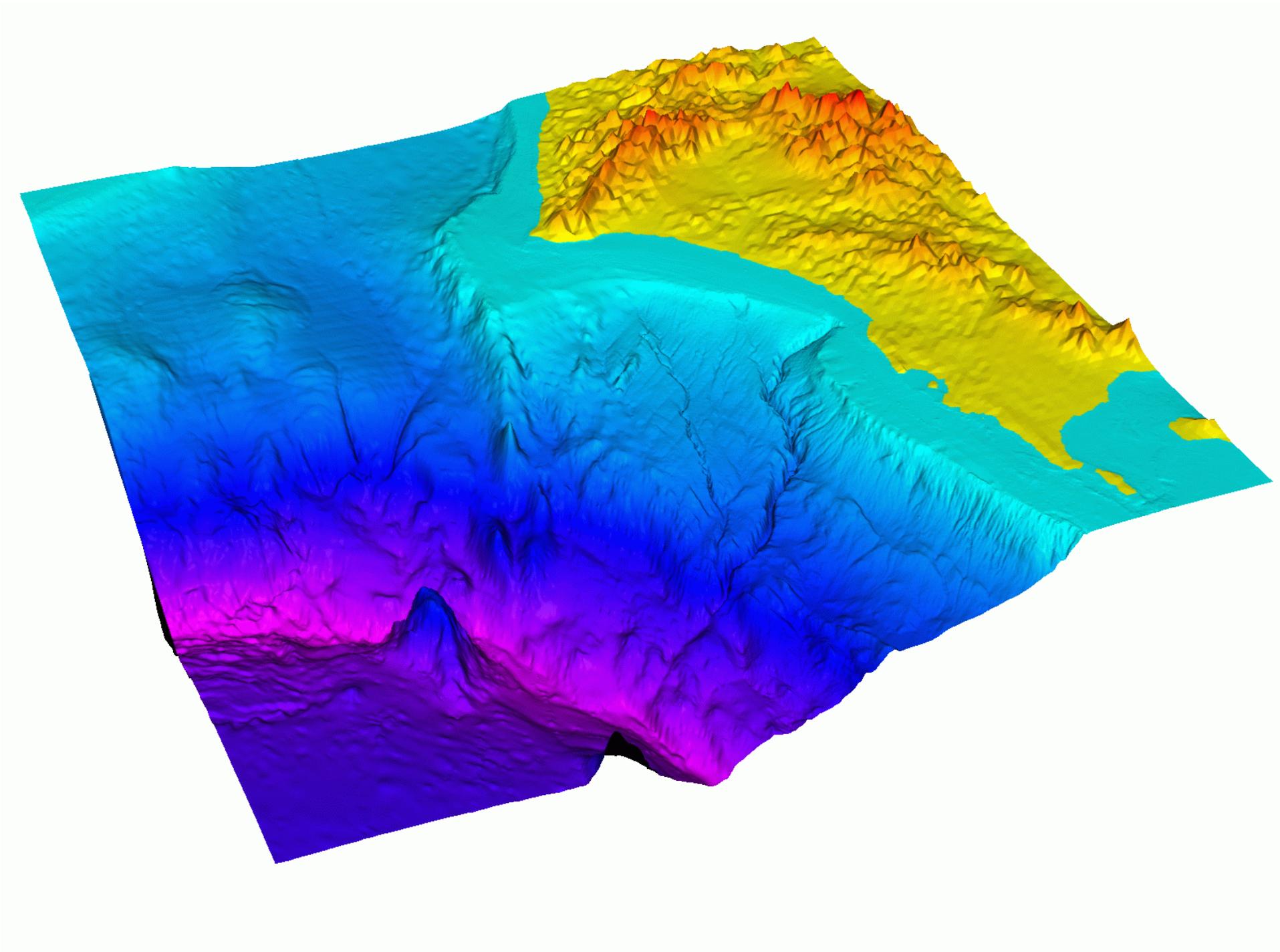
Топография океанического дна



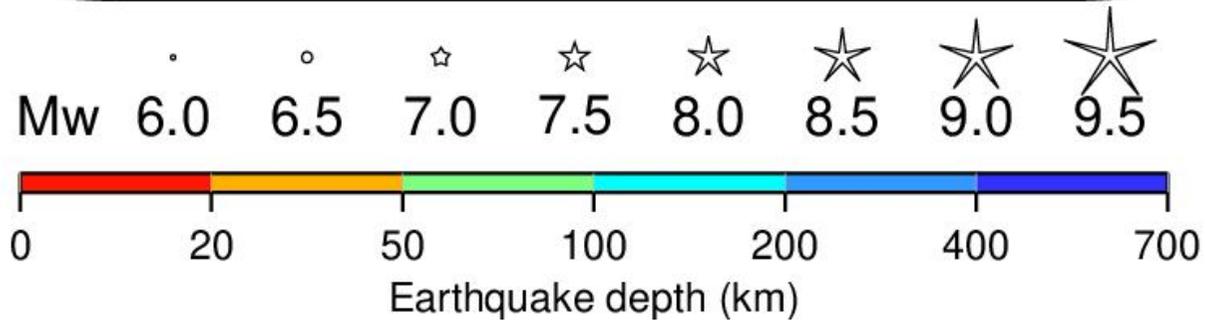
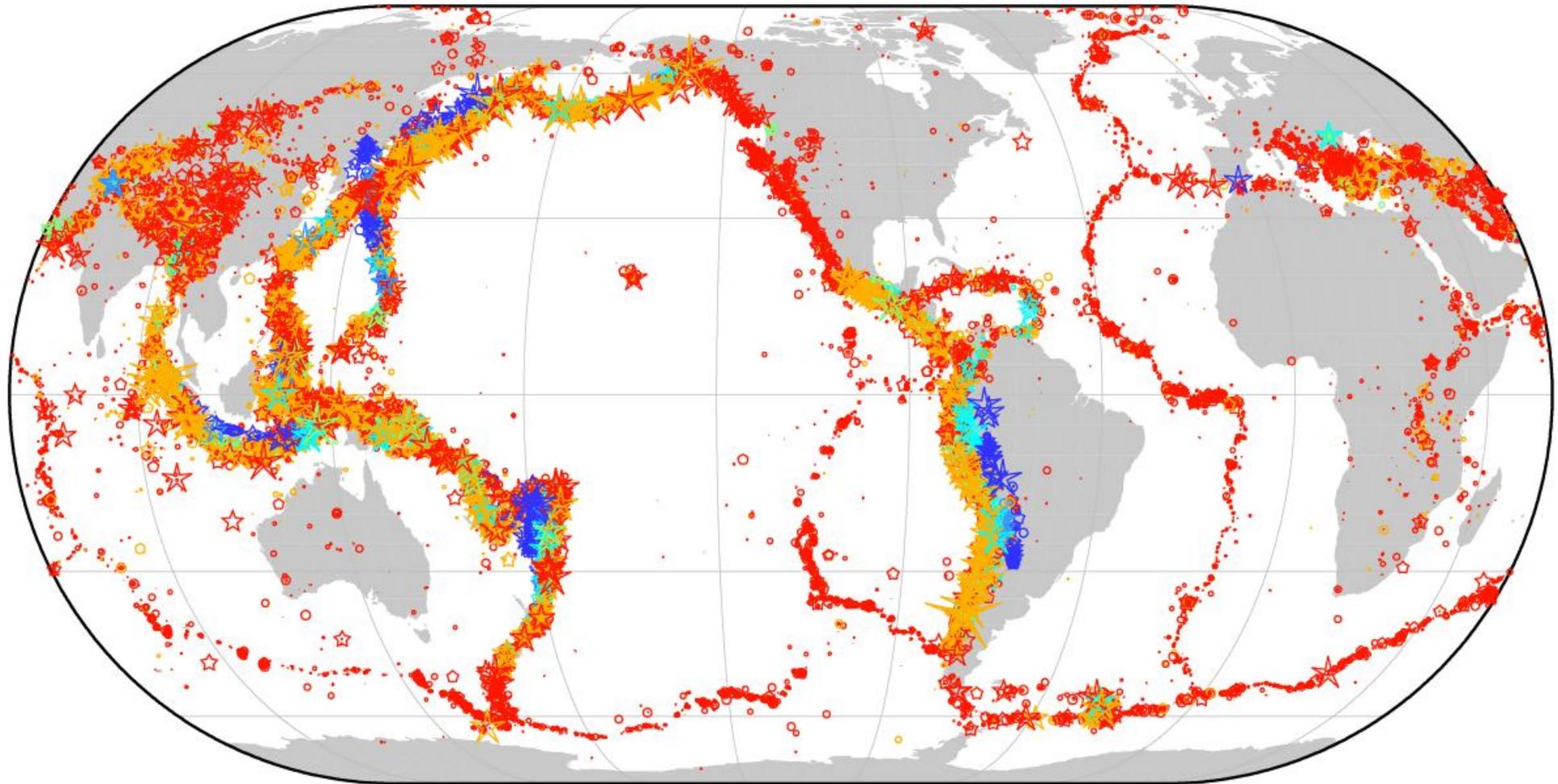
the GEBCO_2024 Grid, is a global terrain model for ocean and land, providing elevation data, in meters, on a 15 arc-second interval grid (<https://www.gebco.net/>)

Основные крупномасштабные формы рельефа дна

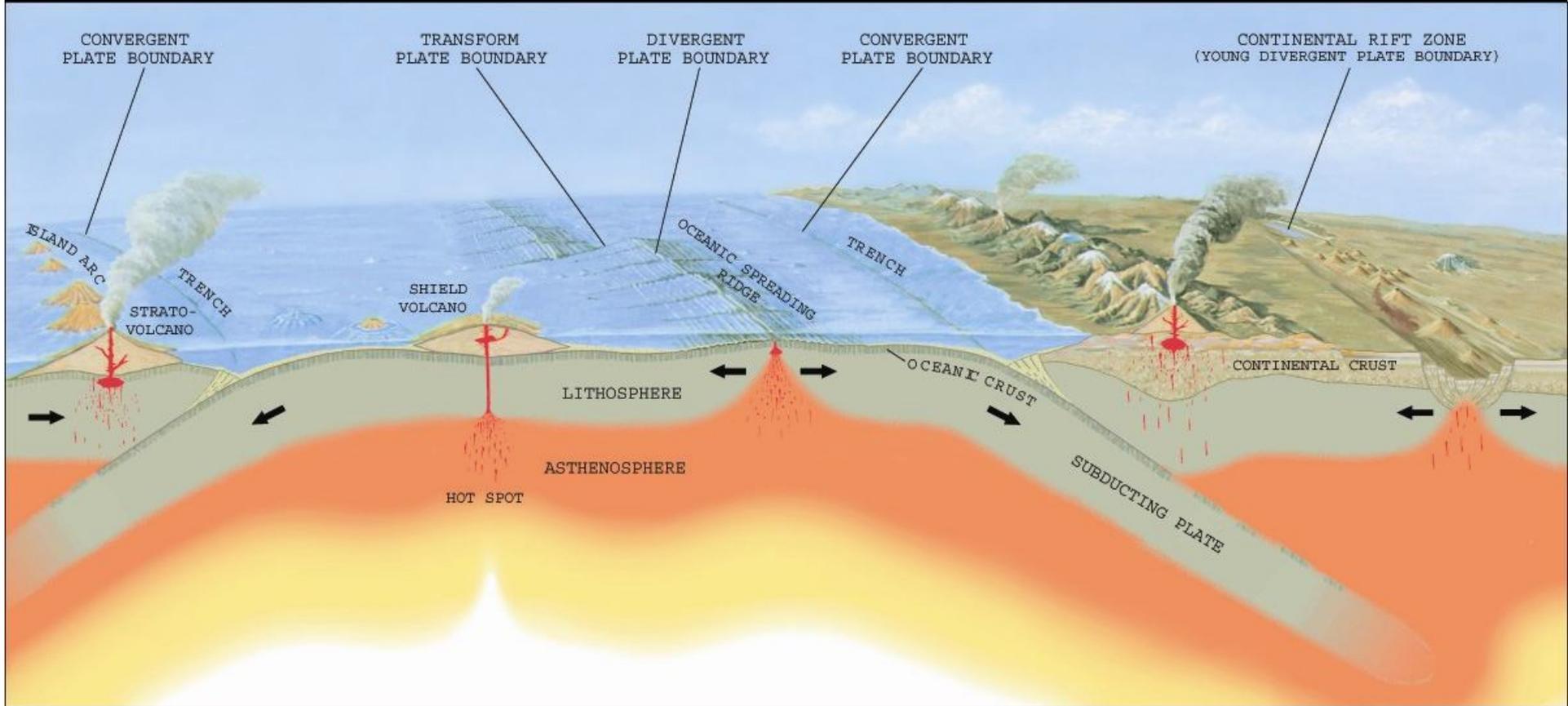
<i>Форма</i>	<i>Глубины, м</i>	<i>Уклон</i>
Шельф	0-200	0.002 (ср.)
Материковый склон	200-3000	~0.01-0.1
Материковое подножие	3000-4000	~0.001-0.01
Ложе океана, Океанические котловины	4000-6000	
Срединно-океанические хребты	2500-4000	~0.005
Глубоководные желоба	>6000	~0.1



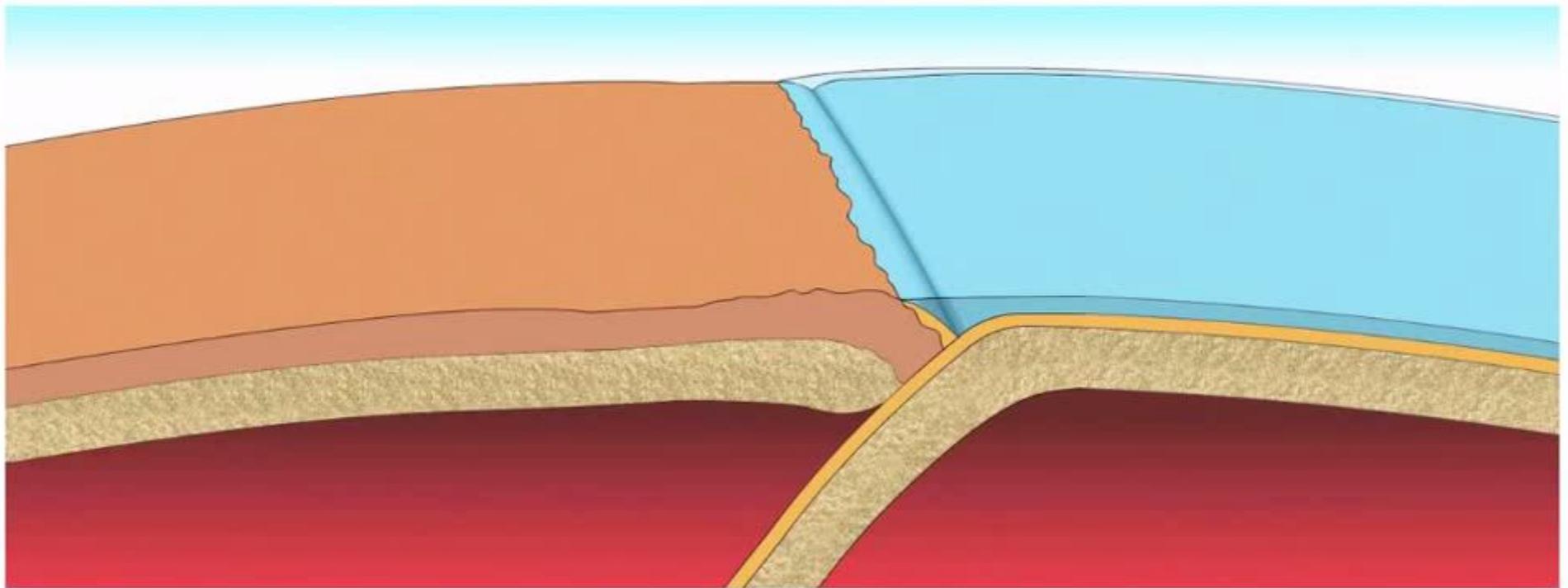
ISC-GEM Catalogue (about 74100 earthquakes)



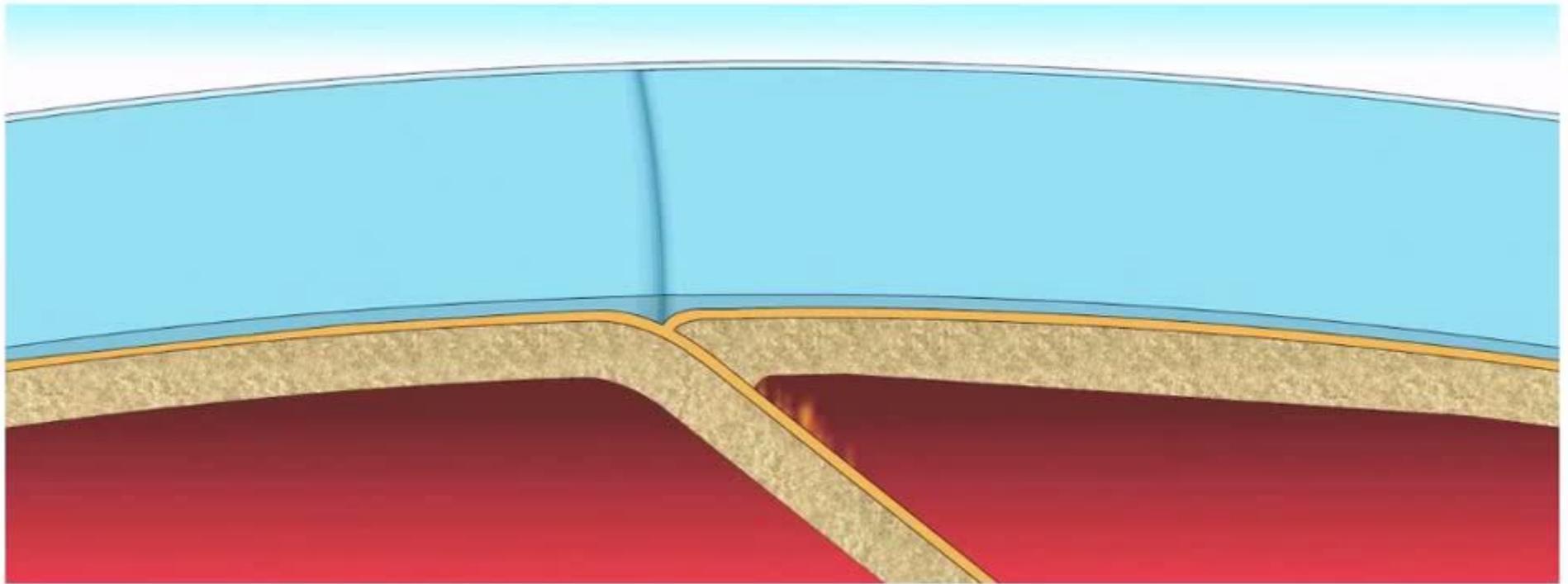




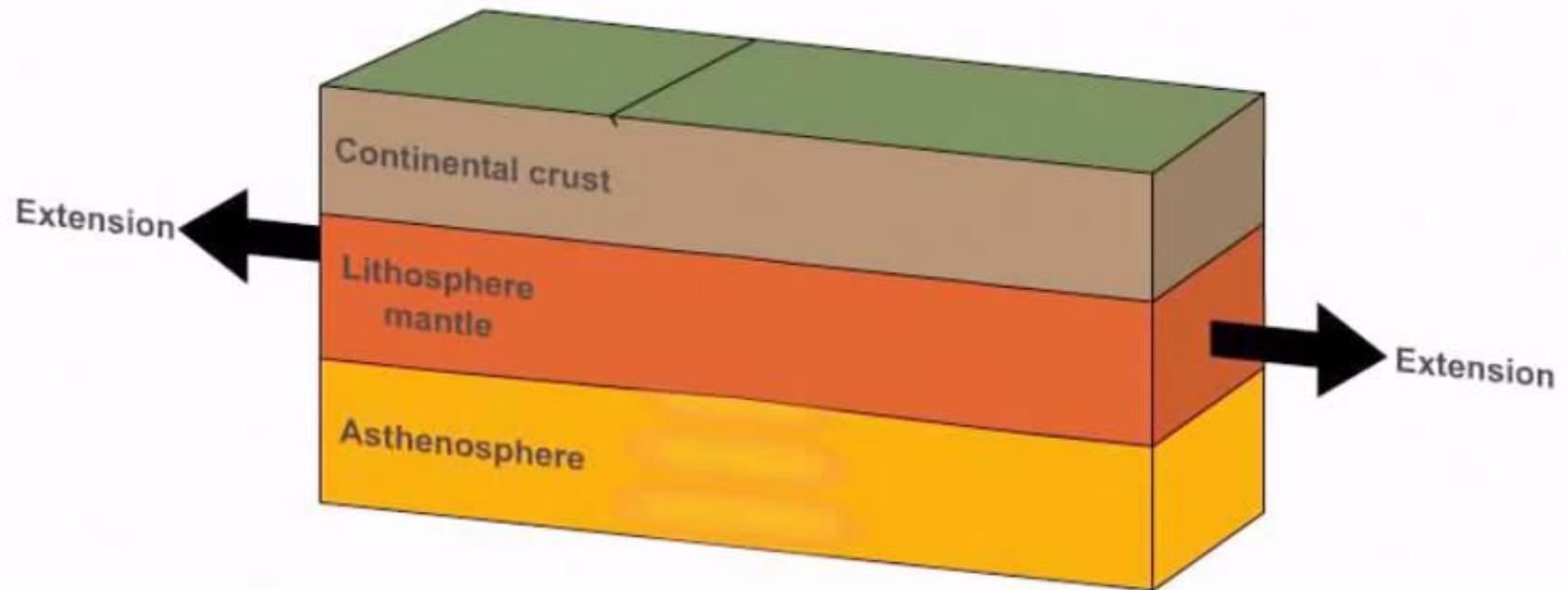
Subduction Zone

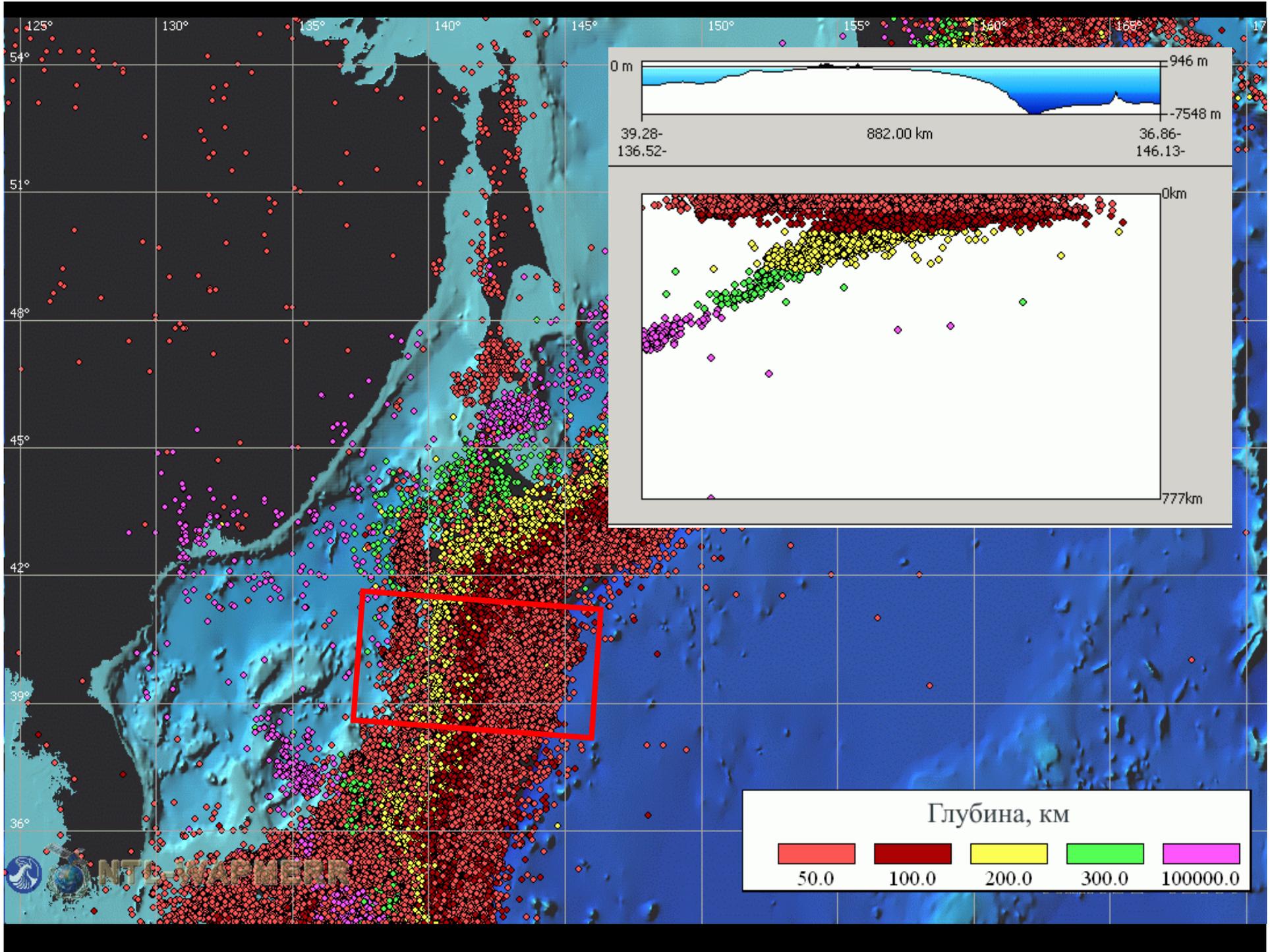


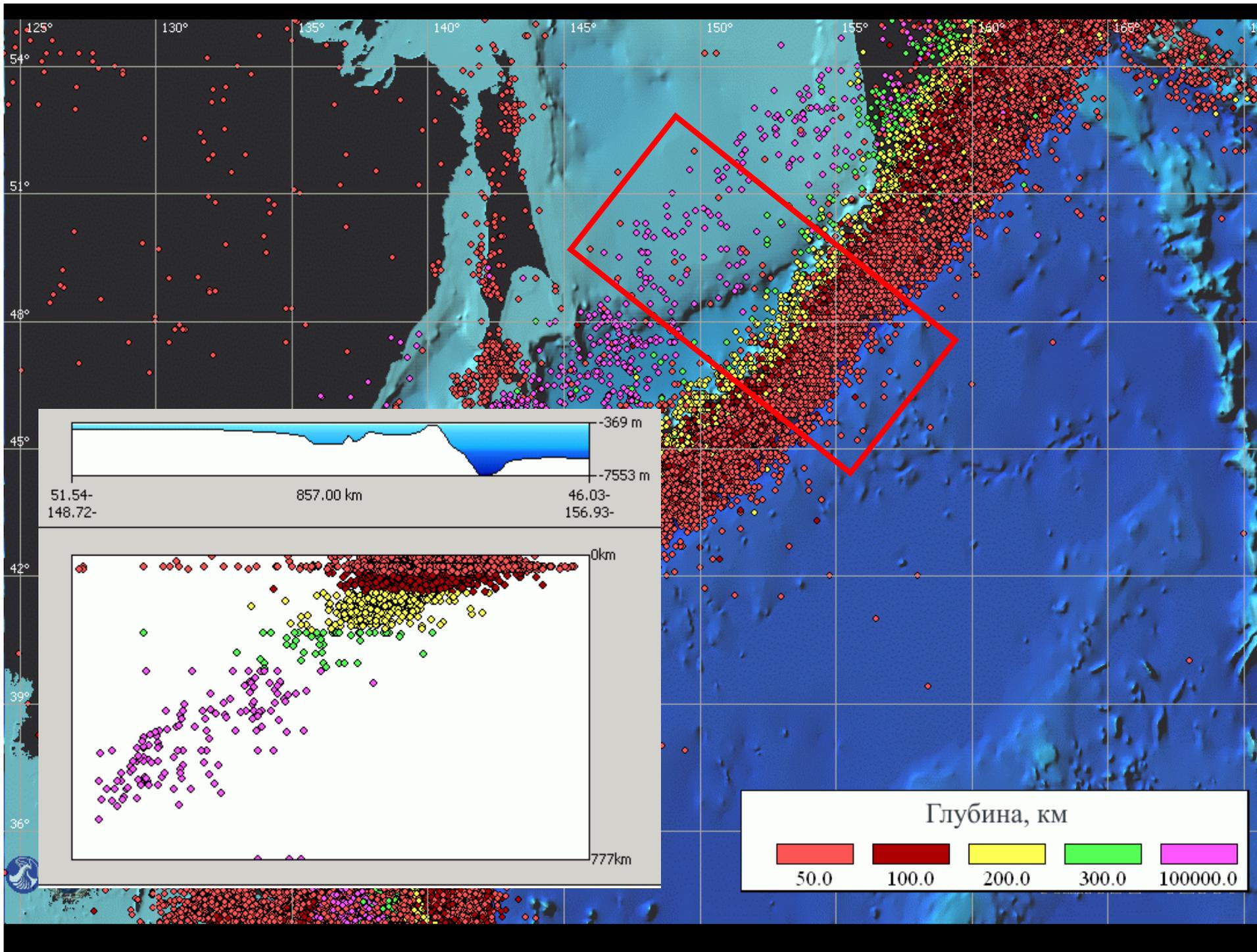
Island Arc

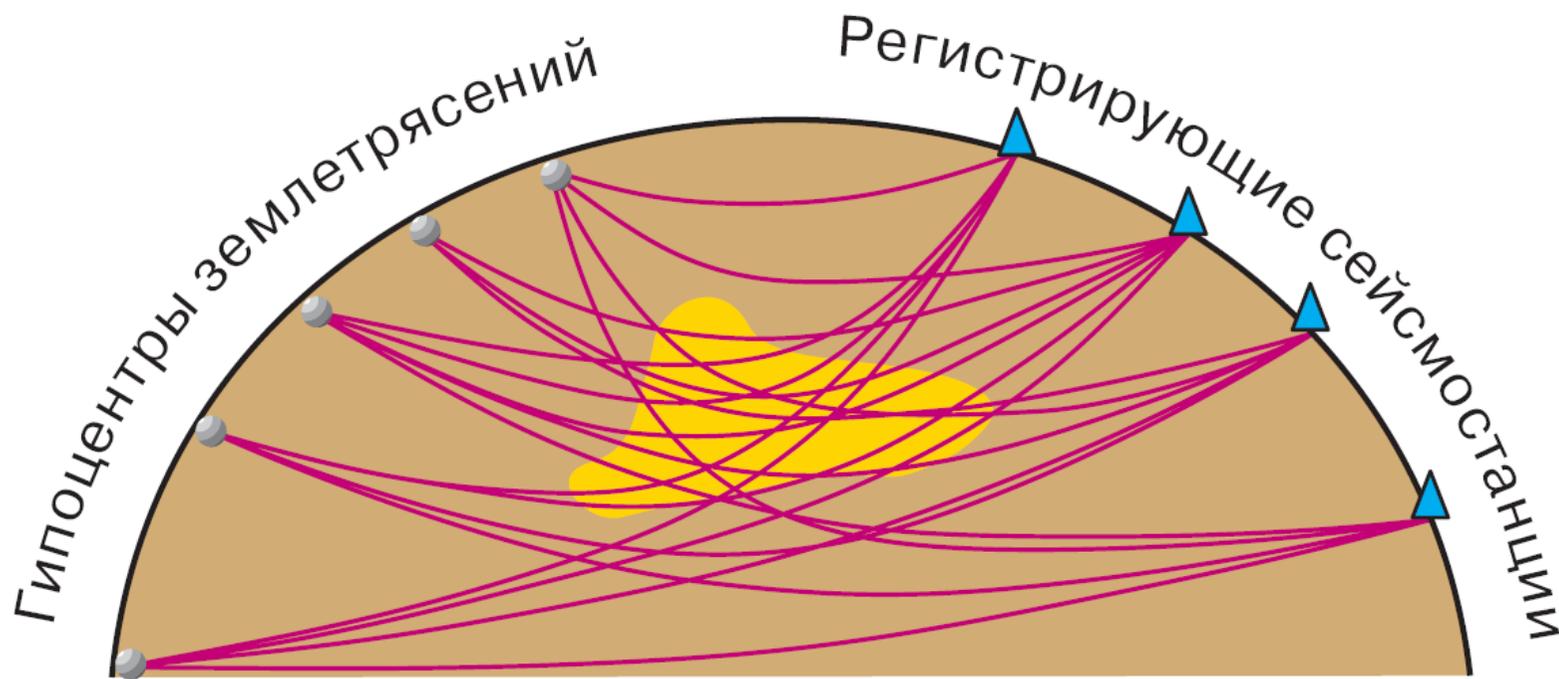


Rift Zone



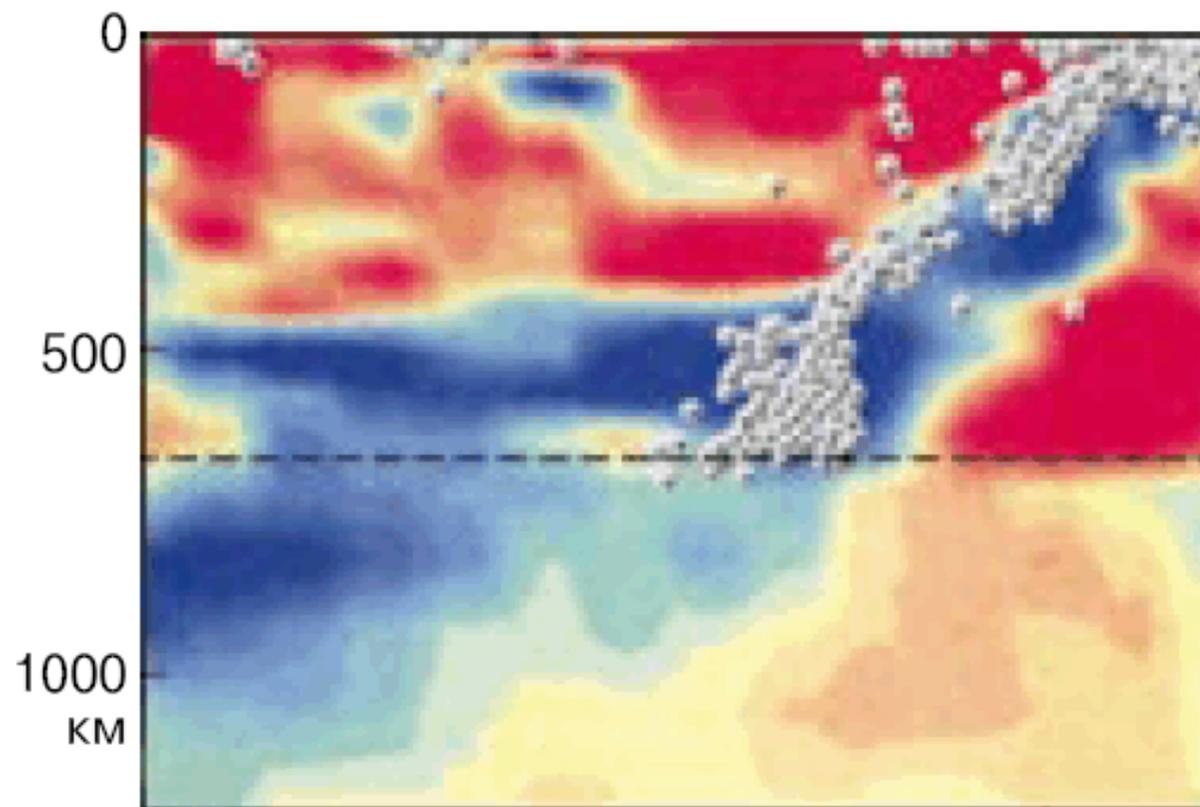






**«быстрые»
или
холодные
области**

**«медленные»
или
горячие
области**



Остров Фиджи – Дуга Тонга. Томографический профиль (по Вижваарду Х., Спэкмену В., Энгдалю Е., 1998). Хорошо видна холодная темно-синяя (“быстрая”) пластина океанической плиты, погружающейся сначала до границы верхней и нижней мантии (~670 км), а далее как бы скользящей по ней и пересекающей ее. Красные участки – область горячей (“медленной”) мантии. Черные кружки – гипоцентры землетрясений

