

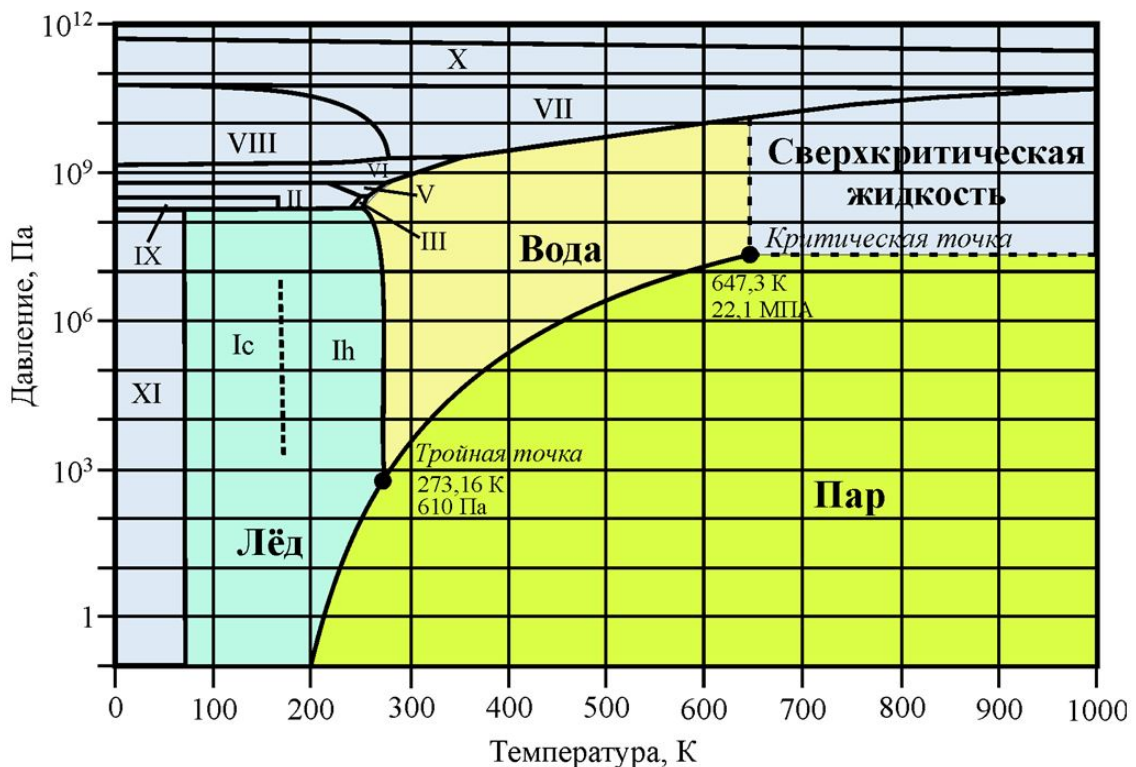
Road to IPhO

В далекой-далекой галактике...

В далекой-далекой галактике вокруг звезды X по почти идеальной круговой орбите вращается планета-океан. Ось собственного вращения планеты перпендикулярна плоскости орбиты, а угловая скорость этого вращения равна угловой скорости вращения планеты вокруг звезды (оба вращения происходят в одном направлении). Сама планета в значительной мере состоит из воды, однако внутри нее есть твердое ядро, в котором происходят процессы ядерного распада и гравитационной дифференцировки недр, порождающие дополнительный поток теплоты, идущий изнутри планеты. При этом вся поверхность планеты снаружи покрыта льдом. Ледяная поверхность шероховатая и загрязненная космической пылью, поэтому на дневной стороне она прогревается достаточно быстро, и при этом излучение в космос идет практически только с поверхности планеты.

Данные о системе X и не только о ней (могут быть использованы в любой части работы)

- радиус звезды X равен $R_X = 7 \cdot 10^8$ м;
- радиус орбиты планеты-океана $r_o = 7 \cdot 10^{11}$ м;
- ускорение свободного падения на поверхности планеты-океана $g = 1$ м/с²;
- максимальная температура на экваторе дневной стороны планеты-океана $T_2 = 100$ К, а температура на полюсе $T_1 = 50$ К;
- плотность воды $\rho_0 \approx 1$ г/см³, плотность льда $\rho \approx 0.9$ г/см³;
- удельная теплота плавления льда $\lambda \approx 340$ Дж/г, удельная теплота парообразования воды $L \approx 2250$ Дж/г;
- фазовая диаграмма воды представлена ниже:



- зависимость коэффициента теплопроводности льда χ от абсолютной температуры T в интересующем нас диапазоне температур с точностью не хуже 5% описывается интерполяционной формулой $\chi(T) \approx 5.40 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}) \cdot \left[1 - \frac{T}{465 \text{ К}}\right]$;
- постоянная Стефана-Больцмана $\sigma \approx 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$.
- максимум спектральной плотности излучения Солнца (то есть отношения мощности излучения ΔP , приходящейся на заданный малый интервал длин волн, к величине этого интервала $\Delta \lambda$) соответствует длине волны $\lambda_S \approx 480$ нм, а температура большей части поверхности фотосферы Солнца близка к $T_S \approx 6000$ К.

Road to IPhO

Часть А. Тепловой баланс и ледяной покров (3.5 балла)

A1 Найдите плотность q_0 потока теплоты, идущего наружу из недр планеты-океана. Выразите q_0 через величины, заданные в условии задачи (получите формулу) и подсчитайте численное значение с точностью не хуже 5%. Ответ выразите в Вт/м². **0.8**

A2 Найдите толщину H_1 ледяного покрова на полюсе. Выразите H_1 через величины, заданные в условии задачи (получите формулу) и подсчитайте численное значение с точностью не хуже 10%. Ответ выразите в метрах. **0.7**

A3 Оцените толщину H_2 ледяного покрова на экваторе с дневной стороны планеты-океана в зоне максимальной температуры. Выразите H_2 через величины, заданные в условии задачи (получите формулу) и подсчитайте численное значение. Ответ выразите в метрах. **0.5**

A4 Определите температуру T_X фотосферы звезды. Выразите T_X через величины, заданные в условии задачи (получите формулу) и подсчитайте численное значение. Ответ выразите в градусах Кельвина. **0.8**

A5 Получите зависимость максимальной дневной температуры T поверхности планеты от широты θ (выведите формулу). **0.5**

A6 Определите длину волны Λ_X , на которую приходится максимум спектральной плотности излучения звезды X . Ответ дайте в нм. **0.2**

Часть В. Полынья и кратер (2.5 балла)

Пусть на экваторе в области, где температура максимальна, на участке поверхности достаточно большой площади (размеры этого участка порядка толщины льда, но намного меньше радиуса планеты) очень быстро и «бесследно» исчез весь слой льда, то есть образовалась полынья.

B1 Оцените время τ подъема воды в полынье до нового равновесного уровня (время отсчитывается от момента исчезновения льда). Выразите τ через величины, заданные в условии задачи, и через ранее найденные величины (получите формулу) и подсчитайте численное значение. Ответ дайте в секундах. **0.8**

B2 Оцените, какова будет толщина h_0 слоя льда в полынье сразу после смерзания ледяного слоя на ее поверхности. Выразите h_0 через величины, заданные в условии задачи (получите формулу) и подсчитайте численное значение. Ответ дайте в метрах. **1.2**

B3 Оцените глубину h_c «кратера», который останется на поверхности льда в том месте, где была полынья, через достаточно большое время. Ответ дайте в метрах. **0.5**

Считайте, что испарение и замерзание воды происходит непосредственно в процессе подъема ее уровня, но окончательное смерзание ледяного слоя на поверхности воды происходит после того, как она почти остановилась на подходе к ее новому уровню.

Часть С. Замерзание тоннеля (4 балла)

Рассмотрим процессы, которые будут происходить после образования в полынье начальной корки льда. Будем считать, что температура поверхности этой корки достаточно быстро сравняется с температурой на поверхности планеты. Ясно, что на нижней кромке ледяного слоя будет происходить замораживание воды, и толщина слоя будет продолжать расти.

C1 Оцените, за какое время t_1 толщина слоя возрастет в два раза по сравнению с начальной толщиной h_0 ? Выразите t_1 через величины, заданные в условии задачи, и через ранее найденные величины (получите формулу) и подсчитайте численное значение. Ответ дайте в земных днях. **1.4**

Road to IPhO

C2 Оцените возраст t_2 полыньи, толщина льда в которой $h = 100$ м. Выразите t_2 через величины, заданные в условии задачи, и через ранее найденные величины (получите формулу) и подсчитайте численное значение. Ответ дайте в земных годах. **1.0**

C3 Оцените возраст t_3 полыньи, нижняя кромка льда в которой сравнялась с нижней кромкой окружающего льда. Выразите t_3 через величины, заданные в условии задачи, и через ранее найденные величины (получите формулу) и подсчитайте численное значение. Ответ дайте в земных годах. **1.6**