

Солнце представляет массивное небесное тело, состоящее из плазмы. Плазма имеет высокую электропроводность, поэтому в ней могут возникать электрические токи и, как следствие, магнитные поля. В минимуме цикла солнечной активности оно имеет приблизительно дипольную структуру, при этом индукция поля на полюсах Солнца максимальна. На поверхности Солнца наблюдаются солнечные пятна — тёмные области на Солнце, температура которых заметно ниже по сравнению с окружающими участками поверхности Солнца. Потемнение в пятнах обусловлено подавлением магнитным полем конвективных движений вещества и, как следствие, снижением потока переноса тепловой энергии в этих областях.

Часть А. Вращение поверхности Солнца (2.3 балла)

Солнце не является твёрдым телом, оно состоит из газообразной плазмы. Точки на разных широтах вращаются с разными периодами, то есть вращение Солнца является дифференциальным. Скорость вращения ω является наибольшей на экваторе $\varphi = 0^\circ$ Солнца и уменьшается при движении к полюсам $\varphi = \pm 90^\circ$. В достаточно широкой окрестности экватора применима формула

$$\omega(\varphi) = a - b \sin^2 \varphi$$

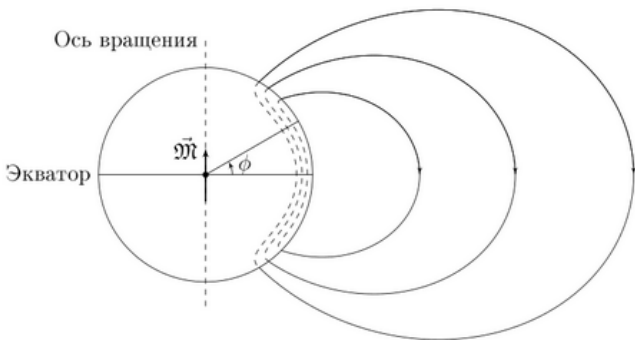
A1^{2.00} Вам представлена таблица экспериментальных данных $\omega(\varphi)$. Данные получены исходя из эффекта Доплера, влияющего на частоту электромагнитного излучения Солнца, регистрируемого на Земле. Определите параметры a и b .

A2^{0.30} Найдите границы применимости формулы, указанной выше.

Часть В. Начальное состояние (1.6 балла)

В момент минимума солнечной активности будем считать магнитное поле Солнца за его пределами полем диполя с магнитным моментом $\mathfrak{M}$. Этот магнитный момент направлен вдоль оси вращения Солнца. Будем называть компоненты поля B_r – направленное вдоль радиуса, B_φ – направленное вдоль увеличения широты, B_λ – направленное вдоль увеличения долготы.

B1^{0.30} Получите все составляющие магнитного поля на поверхности Солнца $B_{0,r}(\varphi)$, $B_{0,\varphi}(\varphi)$, $B_{0,\lambda}(\varphi)$. Ответы выразите через φ , $\mathfrak{M}$, R_0 и μ_0 .



Магнитные линии внутри Солнца проходят перпендикулярно радиус-вектору в слое толщиной $H(\varphi) = H_0 \cos^2 \varphi$, где $H_0 = \xi R_0$, $\xi = 0.05 \ll 1$ и лишь у самого выхода из поверхности закругляются. Считайте, что поле B внутри Солнца равномерно по этому тонкому слою, в котором локализованы магнитные линии. Модуль потока Φ_0 магнитного поля через северное полушарие Солнца равен $8.0 \cdot 10^{13}$ Вб. Радиус Солнца $R_0 = 6.96 \cdot 10^8$ м.

B2^{0.60} Получите величину магнитного поля B_e на экваторе внутри Солнца у его поверхности. Ответ выразите через $\mathfrak{M}$, μ_0 , R_0 , ξ .

B3^{0.10} Найдите численное значение B_e .

B4^{0.60} Получите величину магнитного поля $B_\varphi(\varphi)$ внутри Солнца у его поверхности в зависимости от широты φ . Ответ выразите через φ , B_e .

Часть С. Закручивание магнитных линий (3.2 балла)

Малые магнитные поля (порядка B_e) можно считать вмороженными в плазму в том смысле, что магнитные линии искажаются при относительном движении плазмы. Это значит, что если через точки A и B в начальный момент времени $t = 0$ проходит линия магнитного поля, то и в любой другой момент времени она будет через них проходить. В силу того, что у разных точек поверхности Солнца разная угловая скорость, магнитные линии внутри поверхности Солнца будут искажаться. При этом внешнее поле останется таким же. Момент времени, описанный в части А обозначим за $t = 0$.

C1^{1.70} Точно рассчитайте 30 пар точек (φ, λ) , через которые будет проходить магнитная линия, пронизывающая точки $\varphi = \pm 50^\circ$, $\lambda = 0$ в момент времени $t = 150$ дней.

C2^{1.00} Используя эти данные постройте в листе ответов, как будет выглядеть эта линия для земного наблюдателя.

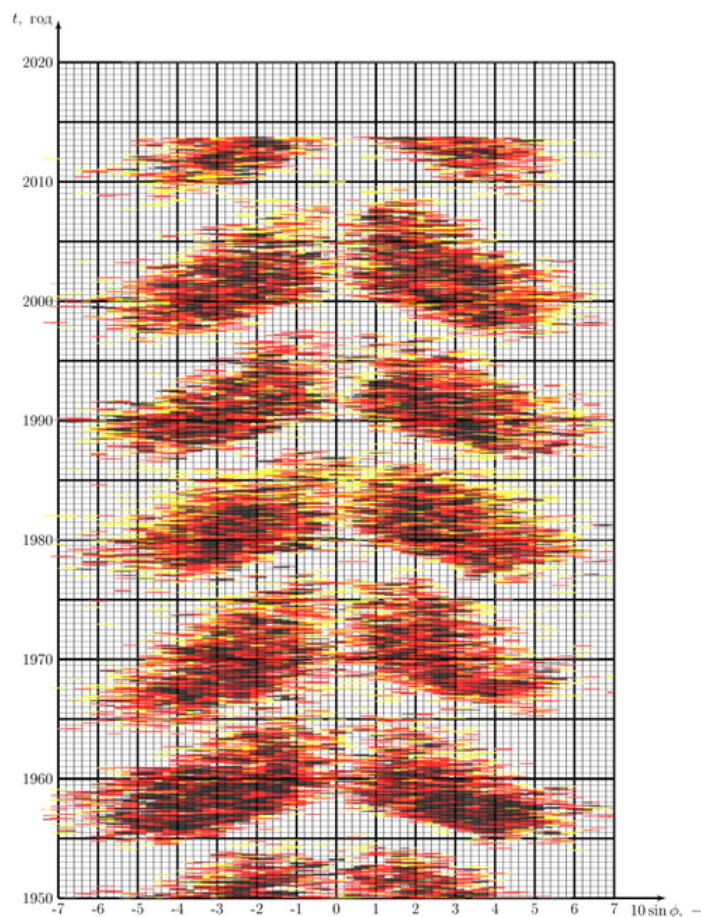
Меридианом называется линия, для которой $\lambda = \text{const}$. Также эта линия получается при пересечении сферы и плоскости, проходящей через ось вращения сферы.

C3^{0.30} Найдите угол $\psi(\varphi, t)$, который составляют магнитные линии с меридианом. Ответ выразите через φ , t , a , b .

C4^{0.20} Пусть внутри Солнца вблизи его поверхности магнитные линии составляют угол ψ с меридианом. Найдите модуль магнитного поля B в этой точке. Ответ выразите через ψ , φ , B_e .

Часть D. Образование солнечных пятен (2.9 балла)

Солнечные пятна на поверхности Солнца образуются, когда магнитное поле внутри Солнца превышает $B_{\text{крит}}$. В каждом последующем пункте Вы можете использовать диаграмму Маундера, на которой цветом указана доля поверхности Солнца (чем темнее, тем больше доля), покрытая солнечными пятнами, а по осям отложены t и $\sin \phi$.



D1^{2.70} Используя приближение $\sin \psi \approx 1$, найдите $B_{\text{крит}}$.

При сильном увеличении поля B внутри Солнца перестает работать модель, описанная ранее в части C. Магнитные линии начинают закручиваться вокруг себя и дипольное магнитное поле подавляется. Из-за этого солнечные пятна начинают пропадать, т.к. величина поля уменьшается. В результате система приходит в начальное состояние с точностью до того, что меняется направление вектора $\mathcal{M}$ на противоположное. Таким образом наша система периодична.

D2^{0.20} Определите период солнечной активности T_0 , т.е. время через которое магнитное поля Солнца возвращается в исходное состояние.