



Роль солнечного ветра в формировании плазменных облаков над поверхностью Луны

А.С. Набатов, А.И. Захаров, А.И. Ефимов
ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН, Фрязино, Россия

Абстракт

В ряде лунных радиозатменных экспериментов с помощью космических аппаратов и естественных радиоисточников были обнаружены плазменные образования с концентрацией до 1000 электронов на кубический сантиметр на высотах в несколько десятков километров над дневной поверхностью Луны [1-3]. Это явление не удается объяснить ионизацией разреженной атмосферы Луны или наличием ионизованных частиц пыли [4-6]. В первом случае ионы увлекаются солнечным ветром, а во втором – известные механизмы ионизации пыли и ее подъема не обеспечивают формирование плазменных облаков с необходимой концентрацией электронов. Формально создание такого слоя плазмы возможно за счет фотоэлектронов, выбиваемых ультрафиолетовым излучением Солнца, поток которых составляет около $10^9 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$. В данном сообщении рассматривается влияние магнитных неоднородностей солнечного ветра на высоту фотоэлектронного слоя и вынос электронов в лунную атмосферу.

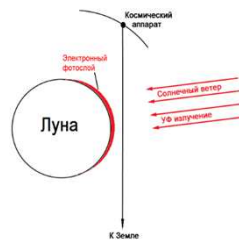


Рис. 1. Схема радиозатменного эксперимента.

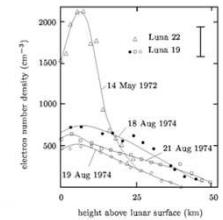


Рис. 2. Электронная плотность плазмы над поверхностью Луны, рассчитанная по результатам радиозатменных экспериментов с космическими аппаратами Луна-19 и Луна-22 (Vyshlov 1976; Vyshlov & Savich 1978)

Влияние магнитных жгутов Солнечного ветра на фотоэлектронный слой на дневной поверхности Луны

По современным представлениям магнитные неоднородности солнечного ветра имеют бессильную структуру магнитного жгута [7]. Обширная статистика прохождения мелкомасштабных магнитных жгутов в окрестности Земли представлена в базе данных (fluxgate.info SMALL-SCALE MAGNETIC FLUX ROPE DATABASE), основанной на измерениях с космическими аппаратами WIND и ACE, которые перемещаются по околоземным орбитам. Наблюдавшиеся события имели длительность от десятков часов до 9 минут. Интенсивность магнитных полей изменялась от единиц нТл до 15-20 нТл. Вероятность прохождения Луны через такие неоднородности достаточно высока. Например, с ноября 2007 г. по июнь 2009 года в рамках проекта SELENE было проведено более 300 сеансов радиопросвечивания окололунного пространства [2]. За это же время число зарегистрированных мелкомасштабных жгутов в наблюдениях с помощью КА WIND – ACE составило более 2000, в среднем более 3 событий за сутки. При попадании такого жгута на Луну токи Биркеланда поглощаются лунной поверхностью, а соответствующее им магнитное поле стремится восстановить эти токи, в результате чего поверхность приобретает заряд, знак которого зависит от направления токов Биркеланда. Согласно теоретической модели толщина фотоэлектронного слоя [8], возникающего на дневной поверхности Луны при перпендикулярном падении УФ-излучения Солнца, порядка 10 см для потока

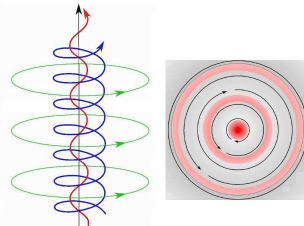


Рис. 3. Модель магнитного жгута. а) Магнитное поле жгута. б) Сечение жгута. Направление токов Биркеланда (розовые кольца) перпендикулярно плоскости рисунка. Силовые линии обозначены стрелками. (Рис. 3 взят из [9])

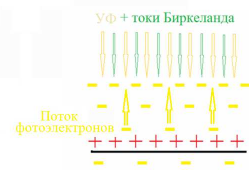


Рис. 4. Формирование фотоэлектронного слоя на дневной поверхности Луны под воздействием УФ и токов Биркеланда магнитного жгута.

фотоэлектронов $0,8 \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$ и кинетической энергии электрона 2 эВ. Кинетическая энергия частиц солнечного ветра значительно превышает эту величину, поэтому они проникают в лунный грунт. Плотность токов в магнитных жгутах достигает единиц наноампер (нА) и более. При концентрации 10 электронов/см³ и плотности тока 1 нА/м² относительная скорость зарядов составит около 620 м/с. Поэтому уже за 1 секунду накопленный заряд обеспечит бы на расстоянии 1 м от поверхности Луны разность потенциалов примерно 50 вольт [10, стр.91]. При положительном поверхностном заряде толщина слоя будет уменьшаться. Более сложные явления вызывает появление отрицательного поверхностного заряда.

Расширение фотоэлектронного слоя в атмосферу Луны

Вертикальная продольная плотность электронов в слое фотоэлектронов, возникающего только под воздействием ультрафиолетового излучения Солнца, имеет порядок 10^5 эл/см^2 и толщину в десятки сантиметров. Однако компенсация токов Биркеланда током фотоэлектронов приведет к лавинному нарастанию токов Биркеланда, которое будет ограничиваться запасом энергии магнитного поля жгута и максимальным током фотоэлектронов. При полной компенсации весь поток фотоэлектронов покидал бы поверхность Луны. При начальной скорости фотоэлектронов 800 км/с и потоке $0,8 \times 10^{11} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ концентрация электронов составила бы 1000 эл/см^3 , что соответствует результатам радиозатменных измерений.

Рис. 5. Негативный заряд лунной поверхности токами Биркеланда приводит к выносу фотоэлектронов в атмосферу Луны.



Время рассеяния τ_D потока фотоэлектронов оценим согласно [10, стр. 244] для частиц, движущихся со скоростью больше тепловой скорости электронов $\tau_D \approx n_e^2 U^3 / 16 \pi n_e e^4 \ln \Lambda$, где $U = 400 \text{ км/с}$ – скорость солнечного ветра, $\ln \Lambda = 25$ – кулоновский логарифм [9, стр. 246], $n_e = 10 \text{ см}^{-3}$ – концентрация электронов в солнечном ветре, получим $\tau_D \approx 80 \text{ с}$. Время торможения потока фотоэлектронов близко времени их рассеяния. Поэтому есть вероятность того, что при скорости вылета, сравнимой со скоростью Солнечного ветра, за время торможения фотоэлектроны должны подниматься на десятки километров над поверхностью Луны.

Заключение

Прохождение Луны через магнитные жгуты Солнечного ветра должно оказывать заметное влияние на высоту фотоэлектронного слоя. В зависимости от направления токов Биркеланда поверхность Луны будет получать положительный или отрицательный заряд. В случае положительного заряда высота фотоэлектронного слоя уменьшается, а в случае отрицательного – толщина слоя возрастает и при превышении дебаевского радиуса, соответствующего плазме Солнечного ветра, фотоэлектроны выносятся в атмосферу. Наибольшее число электронов, покидающих фотослой, определяется плотностью токов Биркеланда. При выполнении представленных оценок, предполагалось, что форма магнитных жгутов сохраняется при прохождении через Луну. В случае правильности сделанных предположений и оценок следует вывод, что взаимодействие магнитных жгутов СВ с фотоэлектронным слоем может быть причиной формирования плазменного слоя на поверхности Луны, обнаруженного в радиозатменных экспериментах. Представленные оценки являются предварительными и могут быть конкретизированы по мере поступления новых экспериментальных данных и уточнения модели физической среды в окололунном пространстве.

Литература

- [1] 19. А. С. Вышлов, Н. А. Савич, Космические исследования 16, 551 (1978)
- [2] T. Imamura, A. Nabatov, N. Mochizuki, T. Iwata, H. Hanada, K. Matsumoto, H. Noda, Y. Kono, Q. Liu, Y. Futaana, H. Ando, Z. Yamamoto, K.-I. Oyama, and A. Saito, Radio occultation measurement of the electron density near the lunar surface using a subsatellite on the SELENE mission, JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, VOL. 117, A06303, doi:10.1029/2011JA017293, 2012.
- [3] S. Pluchino, F. Schilliro, E. Salerno, G. Puppillo, G. Maccaferri, and P. Cassaro (2008) Radio occultation measurements of the lunar ionosphere, Mem. S.A.It. Suppl. Vol. 12, ©SAIt
- [4] Savich, N. A. (1976), Cislunar plasma model, Space Res., 16, 941–943.
- [5] Stubbs, T. J., R. R. Vondrak, and W. M. Farrell (2006), A dynamics fountain model for lunar dust, Adv. Space Res., 37, 59–66.
- [6] Stubbs, T. J., D. A. Glenar, W. M. Farrell, R. R. Vondrak, M. R. Collier, J. S. Halekas, and G. T. Delory (2011), On the role of dust in the lunar ionosphere, Planet. Space Sci., 59, 1659–1664.
- [7] Scott D.E., Birkeland Currents: A Force-Free Field-Aligned Model, PROGRESS IN PHYSICS, Issue 2 (April), Volume 11 (2015)
- [8] Walbridge E., 1973, Lunar photoelectron layer, J. Geophys. Res., vol. 78, No. 19, pp. 3668-3687.
- [9] Кролл Н., Трайвеллис, Основы физики плазмы, «Мир», 1975
- [10] Сивухин Д.В., Кулоновские столкновения в полностью ионизованной плазме, Вопросы теории плазмы, Вып.4, Атомиздат, 1964