

УДК 52-87

Моделирование метеорологического спутника, оснащенного зондом Лонгмюра, для измерения параметров космической плазмы

Агха Мостафа Ахмед Хассан Шебл

Пискунова Нина

Маслова Татьяна Ивановна^(*)

eng.m.gha98@gmail.com

nina.piskunov@gmail.com

mas.tatiana2009@yandex.ru

SPIN-код: 7110-3851

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. Обозначена проблема отсутствия метеорологических спутников для дистанционного зондирования территории Македонии с целью прогнозирования погоды и изучения климатических изменений. Представлены конструктивные особенности метеорологического спутника. Рассмотрен принцип работы зонда Лонгмюра и его использование для исследования свойств плазмы в ионосфере Земли. Разработана методика измерения параметров ионосферной плазмы: плотности, температуры электронов и ионов, плазменного потенциала. Представлена вольт-амперная характеристика для одиночного зонда Лонгмюра. Прослежено изменение потенциала плазмы при различных напряжениях.

Ключевые слова: метеорологический спутник, дистанционное зондирование, зонд Лонгмюра, космическая плазма, вольт-амперная характеристика

Simulation of a meteorological satellite equipped with a Longmuir probe for measuring the parameters of cosmic plasma

Agha Mostafa Ahmed Hassan Shebl

Piskunova Nina

Maslova Tatyana Ivanovna^(*)

eng.m.gha98@gmail.com

nina.piskunov@gmail.com

mas.tatiana2009@yandex.ru

SPIN-code: 7110-3851

BMSTU, Moscow, Russia

Abstract. The problem of the lack of meteorological satellites for remote sensing of the territory of Macedonia in order to predict weather and study climate change is indicated. The design features of the meteorological satellite are presented. The principle of operation of the Longmuir probe and its use for studying the properties of plasma in the Earth's ionosphere are considered. A method for measuring the parameters of ionospheric plasma: density, temperature of electrons and ions, plasma potential has been developed. The volt-ampere characteristic for a single Langmuir probe is presented. The change in the plasma potential at various voltages was traced.

Keywords: meteorological satellite, remote sensing, Longmuir probe, space plasma, volt-ampere response

Введение. В Македонии для целей метеорологии и климатологии основным источником данных являются автоматические метеостанции, а не спутниковые данные. Автоматическая метеостанция представляет собой систему наблюдения, состоящую из нескольких автономных устройств, которые выполняют измерения, а данные считываются и принимаются от центрального блока сбора данных и передаются пользователю. Анализ погоды проводится на основе данных измерений, которые поступают с метеорологических станций страны и региона в целом в национальный гидрометеорологический центр.

Но в метеорологии и климатологии Македонии не применяются такая передовая технология, как дистанционное зондирование. А ведь метеорологические спутники играют ключевую роль в прогнозировании погоды и изучении климатических изменений. Низкая околоземная орбита позволяет получать данные с высоким пространственным разрешением, что особенно важно для мониторинга небольших территорий, таких как Македония. Поэтому целью нашей работы является моделирование метеорологического спутника, функционирующего на низкой околоземной орбите (НОО) высотой 282 км и предназначенного для ежедневного мониторинга территории Македонии с шириной полосы обзора 250 км. Такой спутник позволяет собирать данные о погодных условиях, изучать влияние космической плазмы на работу оборудования. Задачами нашего проекта стали: конструирование спутника, оснащенного зондом Лонгмюра для измерения параметров космической плазмы, разработка методики измерений параметров ионосферной плазмы: плотности, температуры электронов и ионов, плазменного потенциала.

Материалы и методы. Метеорологические спутники, работающие на низких орбитах (282 км), сталкиваются с воздействием ионосферной плазмы, что требует точного мониторинга ее параметров. Для этого применяются зонды Лонгмюра — устройства, измеряющие плотность плазмы, температуру электронов и ионов. Зонд Лонгмюра представляет собой диагностический инструмент в физике плазмы, используемый для измерения электронной температуры и плотности плазмы. Его разработал Дэвид Сидней Лонгмюр, канадский физик, в середине 20 века. С тех пор зонд Лонгмюра стал важным инструментом для понимания поведения и свойств плазмы в различных приложениях, включая исследования термоядерного синтеза, исследование космоса и промышленную плазменную обработку [1].

В космических исследованиях зонд Лонгмюра используется для исследования свойств плазмы в ионосфере Земли и других планетарных средах. Понимая температуру и плотность электронов в этих регионах, ученые могут получить представление о динамике верхних слоев атмосферы, а также о взаимодействии солнечного ветра и планетарных магнитных полей [2].

Основной принцип зонда Лонгмюра относительно прост. Он состоит из небольшого металлического стержня или проволоки, который вставляется в плазму (рис. 1). На зонд подается небольшое отрицательное напряжение по отношению к потенциалу плазмы, что приводит к притяжению электронов

к поверхности зонда. Когда электроны сталкиваются с зондом, они теряют энергию, и их ток измеряется как функция напряжения зонда.



Рис. 1. Зонд Лонгмюра

Из вольт-амперной характеристики, полученной с помощью зонда Лонгмюра, можно извлечь ценную информацию о плазме. Электронную температуру можно определить, анализируя зависимость электронного тока от напряжения зонда. При низких напряжениях зонда в токе преобладают электроны высокой энергии, тогда как при более высоких напряжениях ток, в основном, обусловлен электронами низкой энергии. Подгоняя кривую вольт-амперной характеристики к теоретической модели, можно точно определить температуру электронов [3].

Помимо температуры электронов, зонд Лонгмюра также может предоставить информацию об электронной плотности плазмы. Электронный ток, собираемый зондом, прямо пропорционален плотности электронов плазмы, что позволяет определить этот важный параметр. Измеряя ток при различных напряжениях зонда, можно получить профиль электронной плотности плазмы [4].

Результаты. Установка состоит из подключенного к источнику питания блока управления, в который входит вакуумметр, вакуумной камеры, расположенных в алюминиевой пружине электродов, вольтметра, подключенного параллельно, амперметра, подключенного последовательно, балластного сопротивления и вакуумных насосов (рис. 2).

Для моделирования плазменной среды использована упрощенная модель плазмы без учета энергичных частиц, паразитных токов и магнитных полей для снижения вычислительных затрат. Параметры плазмы выбраны аналогично низкоширотной ионосфере (плотность $n_e = n_i \cdot 2,0 \text{E}13 \text{ м}^{-3}$, температура электронов $T_e = 3950 \text{ К}$ ($T_e = 0,34 \text{ эВ}$), ионов $T_i = 1500 \text{ К}$ ($T_i = 0,13 \text{ эВ}$).

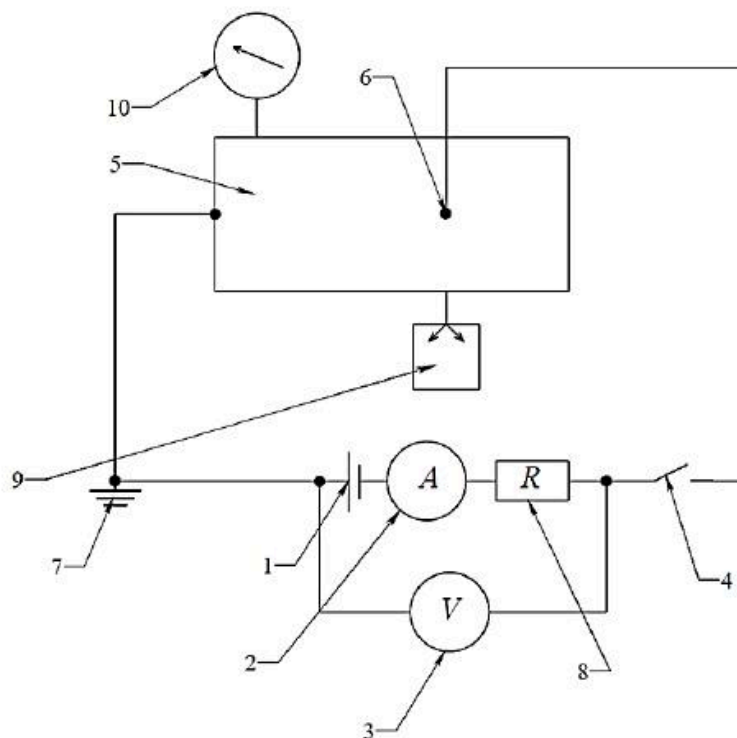


Рис. 2. Схема установки:

1 — источник питания; 2 — амперметр; 3 — вольтметр; 4 — ключ; 5 — вакуумная камера; 6 — электроды; 7 — заземление; 8 — балластное сопротивление; 9 — вакуумный насос; 10 — вакуумметр

Дебаевская длина ($\lambda_D = 0,001$ м) сравнима с размерами спутника, что позволяет аппроксимировать его как сплошной объект.

Для космического аппарата (рис. 3) разработаны два зонда Лонгмюра с параметрами:

- диаметр 2 мм;
- длина кончика 20 см;
- длина стрелы 70 см;
- расстояние между зондами 40 см.

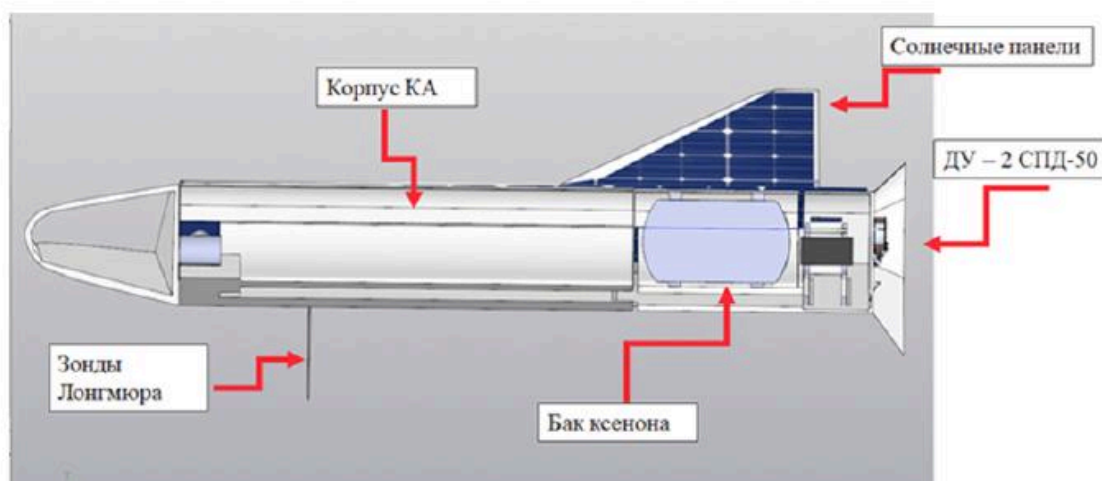


Рис. 3. Космический аппарат с зондами Лонгмюра

Обсуждение полученных результатов. Моделирование взаимодействия зонда Ленгмюра с плазмой проводилось методом пошагового изменения потенциала зонда в диапазоне от $-4,0$ В до $+4,0$ В. Для каждого значения напряжения фиксировался ток, что позволило построить вольт-амперную характеристику (ВАХ) и проанализировать распределение потенциала в окружающей плазме.

На рис. 4 представлена ВАХ для одиночного зонда Ленгмюра. Характер кривой подтверждает типичное поведение зонда в плазме:

- область ионного тока (отрицательные потенциалы);
- область электронного тока (положительные потенциалы);
- точка плавающего потенциала, где ток равен нулю.

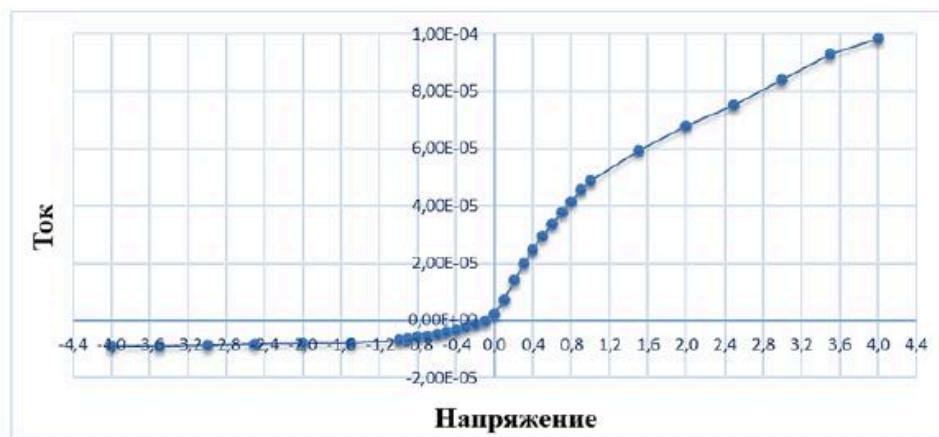


Рис. 4. ВАХ для одиночных зондов Ленгмюра

При различных напряжениях изменяется потенциал плазмы вокруг зонда: при $0,0$ В наблюдается начальное равновесное состояние; при положительных напряжениях ($1,0$ – $4,0$ В) формируется область повышенного потенциала, притягивающая электроны; при отрицательных напряжениях ($-1,0$ – $4,0$ В) зонд отталкивает электроны, что приводит к локальному изменению плазменного потенциала (рис. 5).

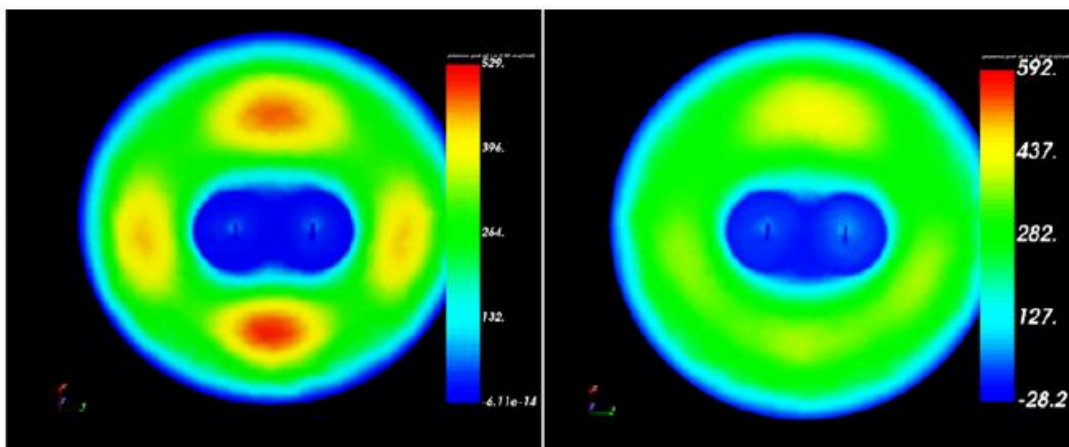


Рис. 5. Потенциал плазмы при $+3,0$ В (слева) и при $-2,0$ В (справа)

Заключение. Разработанная конструкция зондов Ленгмюра подходит для использования на метеорологическом спутнике Македонии на высоте 282 км. Моделирование подтвердило, что выбранные параметры плазмы и геометрия зондов позволяют проводить точные измерения без значительного возмущения среды. ВАХ и распределение потенциала соответствуют теоретическим ожиданиям, что доказывает точность методики. Разработанная система зондов позволяет точно измерять ключевые параметры ионосферной плазмы: плотность, температуру электронов и ионов, плазменный потенциал. Результаты работы могут быть использованы для мониторинга космической погоды и калибровки других научных приборов на борту спутника.

Список источников

- [1] Панасюк М.В., Сафиоллин Ф.Н., Логинов Н.А., Пудовик Е.М. *Картография, фотограмметрия и дистанционное зондирование Земли*. Казань, Казанский (Приволжский) федеральный университет, 2018, 37 с.
- [2] Liu Y., Shi P., Zhang X., Lei J., Ding W. Laboratory plasma devices for space physics investigations. *Rev. Sci. Instrum.*, 2021, vol. 92, art. no. 071101.
- [3] Rust D.M. Coronal disturbances and their terrestrial effects. *Space Sci. Rev.*, 1983, vol. 34, pp. 21–36.
- [4] Чен Ф.Ф. *Введение в физику плазмы*. Москва, Мир, 1987, 312 с.