

Масс-спектрометрия как способ исследования верхних слоёв атмосферы

Астрономия

Гаврилов Д.О.

*1 курс, ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет
имени академика С.П.Королева», г. Самара*

*Научный руководитель: Щербаков М.С., научный сотрудник Межвузовской
кафедры космических исследований, г. Самара*

Введение

Мониторинг состава атмосферы в настоящее время активно применяется не только для фундаментальных исследований воздушной оболочки нашей планеты, но и для исследования динамики антропогенных и природных процессов, происходящих на земной поверхности. Универсальное решение для исследования состава атмосферы Земли до сих пор не было разработано в том числе по причине того, что атмосфера сильно неоднородна по составу и для исследования разных её подсистем требуется применять специально разработанные для этого методы. Исследование ионосферы является актуальной проблемой, не только по причине того, что связано с решением как фундаментальных вопросов физики космической плазмы, но и имеет существенное прикладное значение касающееся распространения радиоволн различных диапазонов.

Цель: предложить эффективный способ мониторинга верхних слоёв атмосферы в силу их малой изученности.

Детальное исследование строения и состава ионосферы позволит расширить и уточнить имеющиеся сведения о плотности и давлении воздуха, его составе и движении в верхних слоях земной атмосферы, об электрических свойствах ионосферы, космическом излучении, ультрафиолетовом участке солнечного

спектра, солнечной радиации во всех ее проявлениях, о твердой компоненте космического вещества, земном магнитном поле. Помимо фундаментального значения эти исследования представляют и большой практический интерес, позволяя усовершенствовать службу и прогнозы погоды, уточнить вопросы дальней радиосвязи, получить необходимые сведения для разрешения проблемы межпланетных сообщений. Ведь мы не ограничиваемся нашей планетой, при успешной реализации проекта его можно практиковать на других небесных телах. В общем виде, все методы можно разделить на три больших категории – методы дистанционного мониторинга с применением аналитического оборудования, расположенного на поверхности Земли или на летательных аппаратах; зондовые методы, в которых используются специальные устройства для отбора проб атмосферы с последующей их доставкой в лабораторию для исследования и методы онлайн-мониторинга, для реализации которых аналитическое оборудование располагают на летательных аппаратах или на спутниках. Ионосфера является одним из наиболее сложных для аналитических исследований объектов не только в силу своей удаленности, но и по причине того, что зондовые методы практически не применимы для её исследования. Поэтому я ставлю перед собой задачу – решить данный вопрос.

Порядок моей работы: изучить современные данные об ионном составе атмосферы, способе их получения, предложить свою идею мониторинга, выделить его преимущества и недостатки, определить практическую ценность.

Современные данные об ионосфере.

Интересующая нас область – F2 расположена на высоте 200-1000км от поверхности Земли и состоит не только из нейтральных молекул- компонент атмосферного газа, но и из ионов, образующихся под действием ультрафиолетовых компонент солнечного излучения. Ионизируемая компонента – атомарный кислород, преобладающий ион – O+. Максимальная его концентрация находится на высоте 250-400км. Плотность заряженных частиц — $N \sim 10^5—10^6 \text{ см}^{-3}$. На высоте > 500км появляются ионы H+. Вариации параметров

области неоднократно воспроизводились в численных расчётах с использованием одномерных теоретических моделей, основанных на интегрировании уравнений непрерывности, движения и теплового баланса для ионов O^+ , H^+ и электронов[1]. В расчётах удается воспроизводить значения критических частот ионосферы для конкретных условий с точностью порядка 10-30%, а высот максимума с точностью 20км. Посредством таких расчётов было оценено количественное влияние факторов на формирование солнечно-циклических вариаций параметров и плазмосферы[2].

Анализ. Среди современных способов исследования атмосферы, можно выделить наиболее часто используемые (упоминаемые в литературе):

* Вертикальное зондирование. В нижней части ионосферы концентрация электронов возрастает с высотой, вместе с нею уменьшается показатель преломления радиоволн. Волна, достигнув высоты, где показатель преломления для данной частоты обращается в нуль, отразится от этой высоты. Изменяя частоту посылаемой волны и измеряя время её пробега до высоты отражения в ионосфере и обратно, можно определить зависимость этого времени от частоты, концентрацию электронов в ионосфере. Требуется пересчёта фактической высоты после измерений из-за отклонения кажущейся в десятки и сотни километров. Исследуется только участок между приемным и передающим пунктами.

* Наклонное зондирование. Работает по принципу вертикального зондирования. Используется для детального исследования распространения радиоволн по заданной трассе. Необходимость точной синхронизации работы двух пунктов и наличия оперативной связи между ними приводит к тому, что установка с разнесенными приемным и передающим пунктами становится значительно сложнее и дороже в эксплуатации.

* Радиолокационные исследования ионосферы. При использовании УКВ-радиолокаторов в высоких широтах было установлено что они могут принимать отражения от каких-то образований в ионосфере на высотах области E. Развитие исследований выявило большую сложность вопроса, чем ожидалось вначале.

Было установлено, что способностью рассеивать радиоволны обладает не только высокоширотная, но и экваториальная ионосфера.

Масс-спектрометрия

Однако, помимо методов дистанционного зондирования, для исследования ионосферы могут применяться и методы на основе современных подходов аналитической химии – методов высокоинформативного анализа, при помощи которых может получаться информация не только о количестве определенных компонент, но и производиться их идентификация, а также исследоваться динамика их состава[3]. Использование методов высокоинформативного анализа на основе масс-спектрометрии представляется перспективным, т.к. современная масс-спектрометрическая техника становится все более компактной и отличается не высоким энергопотреблением. Исследование состава ионосферы при помощи методов масс-спектрометрии привлекательно еще и по той причине, что ионы по определению являются аналитическим объектом, исследуемым при помощи этого метода. Таким образом, для исследования ионосферы достаточно закрепить на спутник масс-спектрометр. Он позволяет рассортировать частицы по их массам и измерить концентрацию каждого сорта. Данным способом можно быстро получать данные высокой точности и отсылать на Землю. Мы можем сами выбирать необходимую нам высоту, изменяя траекторию спутника.

Конечная установка

Моей идеей является использование радиочастотного масс-спектрометра с ионной воронкой. Он применяется в основном для анализа ионного и молекулярного состава верхних слоев атмосферы. Действие масс-спектрометра основано на разделении положительных ионов, различающихся отношением массы к заряду, в зависимости от степени прироста их энергии в высокочастотных электрических полях. Отсутствие магнитов позволяет создать малогабаритные радиочастотные масс-спектрометры с небольшой массой, потребляющие незначительную мощность и способные выдерживать большие механические и температурные перегрузки, все эти характеристики обязательны

для суровых условий внешних слоёв атмосферы. Минусы - обладает сравнительно малой разрешающей силой и чувствительностью, но благодаря этому может быть выполнен в компактной форме. Применение радиочастотного метода резко снижает габариты и вес массового анализатора и уменьшает его сложность. Для эффективной передачи ионов между первой и второй дифференциальными закачками вакуумных каскадов масс-спектрометра необходимо использовать ионную воронку чтобы снизить потерю ионов[4]. Такое решение, предполагающее высокую эффективность передачи от источника ионов атмосферного давления к высокому вакууму даст улучшенную качественную оценку, так как искажение зависимости m/z будет устранено.

Практика исследований атмосферы (<200км) с помощью масс-спектрометрии в период СССР показывает эффективность и качество данного способа.

Конечная установка: небольшая система радиочастотного масс-спектрометра с ионной воронкой (длиной 450 мм, максимум i.d. 60 мм., имеет эффективность 65%) на спутнике (высота полёта ≈ 300 км, $N \sim 10^5$ — 10^6 см⁻³). Первичная обработка информации должна происходить непосредственно на спутнике и далее автоматически отсылаться на Землю, где она может сразу перерабатываться на компьютерах и выводить статистику.

Заключение

Таким образом, мы решаем проблему сложной и малой изученности верхних слоёв атмосферы, эффективной системы слежения за составом ионов. Подобный автоматизированный мониторинг имеет хороший потенциал для развития. Также было бы разумным размещать данные установки на других небесных телах нашей Солнечной системы, это даст возможность изучить присущее им космическое излучение и солнечную радиацию и многие другие важные факторы.

Список используемой литературы

[1]**Ю. С. Седунов** Атмосфера : Справочник : (Справ. данные, модели) / Ю. С. Седунов - Л. : Гидрометеиздат, 1991. - 508 с. : ил.; 30 см.; ISBN 5-286-00245-5

[2]**Брюнелли Б.Е.** Физика ионосферы : Академическая и специальная литература / Брюнелли Б.Е. Намгаладзе А.А. – отв. ред. Г. С. Иванов-Холодный, М. И. Пудовкин; АН СССР, Ин-т земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн. - М. : Наука, 1988. – 526 с. : ил.; 22 см.; ISBN 5-02-000716-1

[3]**Сысоев А.А.** Введение в масс-спектрометрию / А.А. Сысоев, М.С. Чупахин. - Москва : Атомиздат, 1977. - 302 с. : ил.; 21 см.

[4]**Келли Р. Т.** «The ion funnel: Theory, implementations, and applications» / Келли Р. Т. ; Толмачев, Алексей В. ; Пейдж, Джейсон С. ; Тан, Кэци; Смит, Ричард Д. - Mass Spectrometry Reviews. 29 : 294–312. doi:10.1002/mas.20232 ISSN 0277-7037 PMC 2824015. PMID 19391099