

Исследование поперечной структуры монохроматических альфвеновских волн в магнитосфере Земли

ВЛАСОВ АЛЕКСАНДР АЛЕКСАНДРОВИЧ, К.Ф.-М.Н.

ИСЗФ СО РАН

ИРКУТСК

A solid blue horizontal bar at the bottom of the slide.

Где? Магнитосфера Земли

Магнитосфера Земли — это заполненная **плазмой** полость, формирующаяся при взаимодействии солнечного ветра с геомагнитным полем планеты. В этой области околоземного космического пространства геомагнитное поле оказывает доминирующее влияние на поведение заряженных частиц.

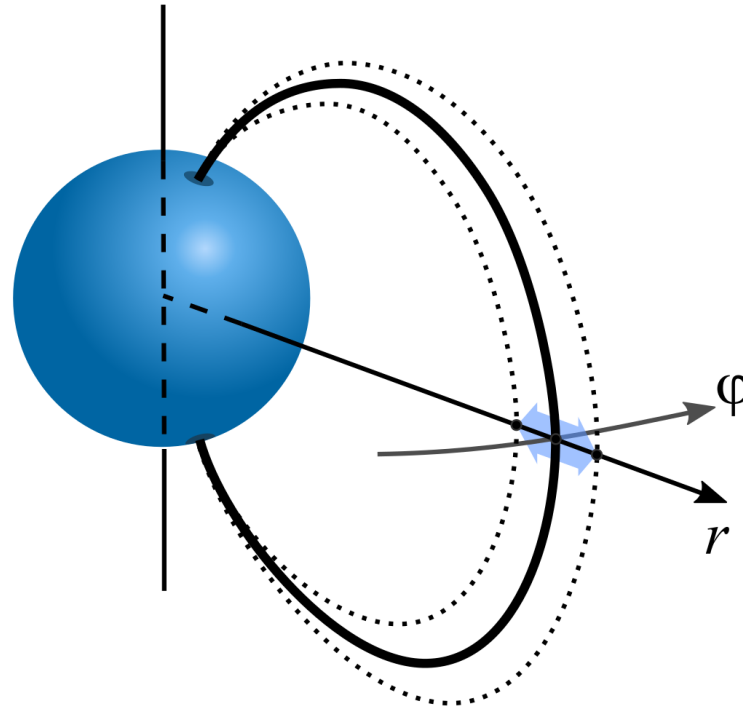
Магнитосфера Земли имеет чрезвычайно сложную структуру и до сих пор не существует её полной единой модели.



Что? Колебания и волны в плазме

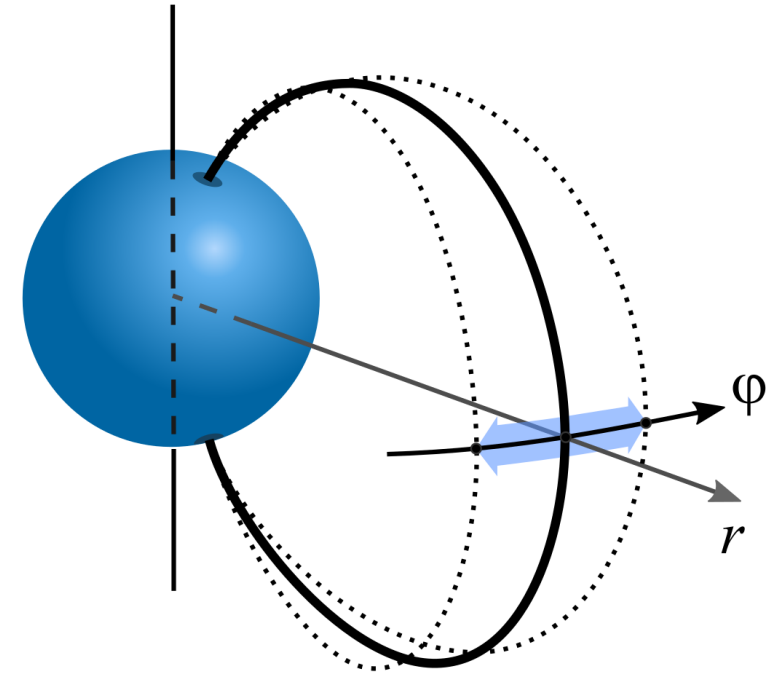
Волновые явления занимают большую и важную часть в физике магнитосферы:

- Являются крупномасштабными переносчиками энергии;
- Участвуют в возникновении полярных сияний;
- Помогают исследовать динамику плазмы и восстанавливать её параметры;
- Примером волны, распространяющейся вдоль магнитных силовых линий, является альфвеновская волна;



Полоидальные колебания
Источниками таких волн
являются резонансные
взаимодействия с частицами

$$|B_r| \gg |B_\phi|$$



Тороидальные колебания
Источником таких волн служит
резонанс силовых линий

$$|B_\phi| \gg |B_r|$$

Два основных теоретических подхода

1. Магнитная гидродинамика (МГД) – рассматривает плазму как жидкость (коллективное поведение частиц под воздействием магнитного поля).
2. Кинетическая теория – функции распределения частиц. Хороша для малых масштабов (когда пространственные масштабы волны сопоставимы с характерными параметрами частиц, например, ларморовским радиусом ионов или скин-длиной электронов).

Данный цикл работ затрагивает оба подхода.

Метод «фазовых портретов»

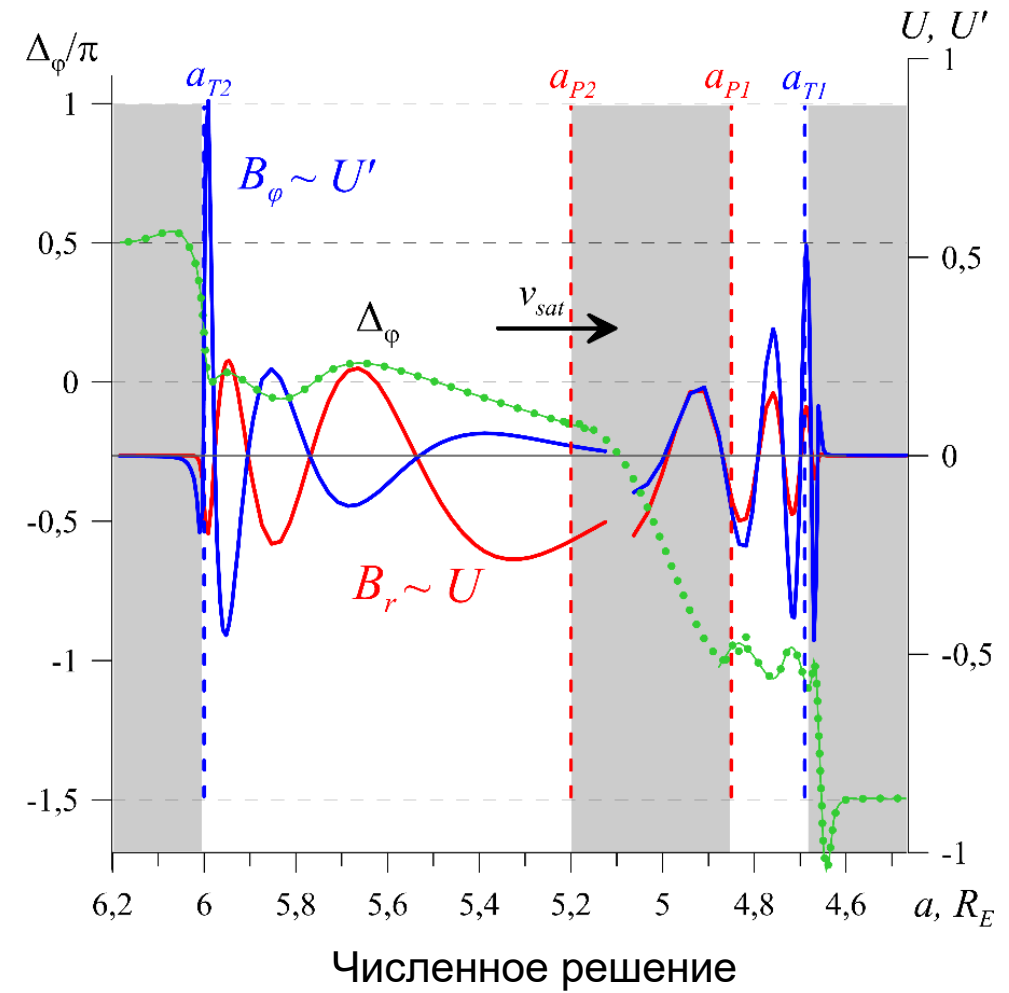
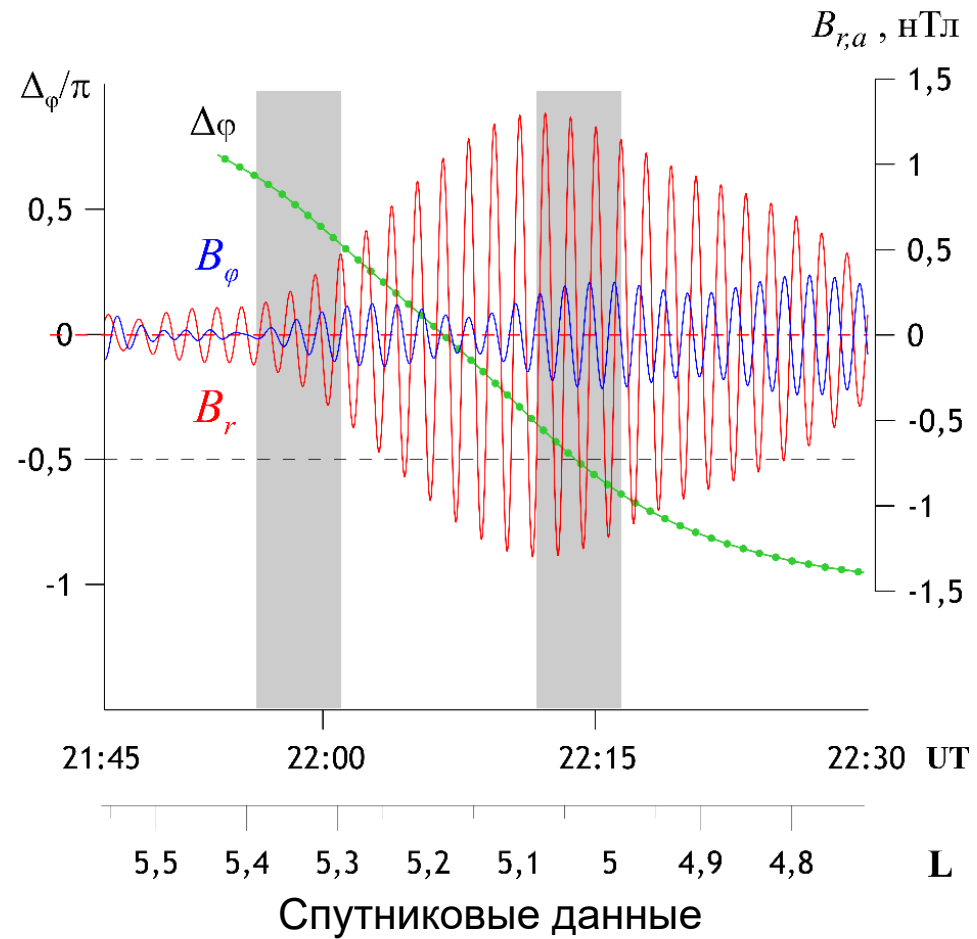
«Фазовый портрет» - совокупность графиков поперечных компонент магнитного поля (радиальной, азимутальной), а также разности фаз между ними.

Фазовый портрет может потенциально:

- Показывать области прозрачности/непрозрачности.
- Находится ли волна в режиме затухания/возбуждения.
- Дать информацию, которая позволит определить тип волны.

Как показало моделирование, **«фазовый портрет»** является уникальной характеристикой волны.

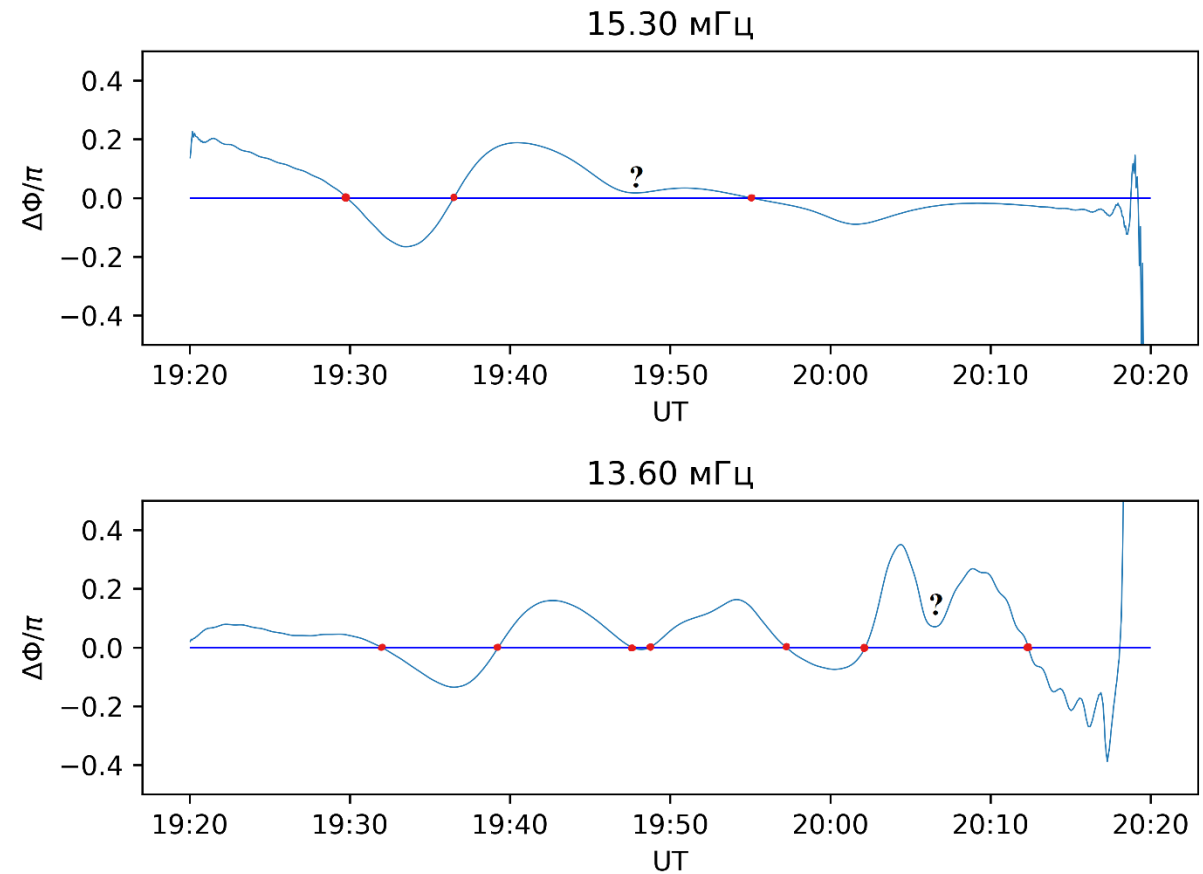
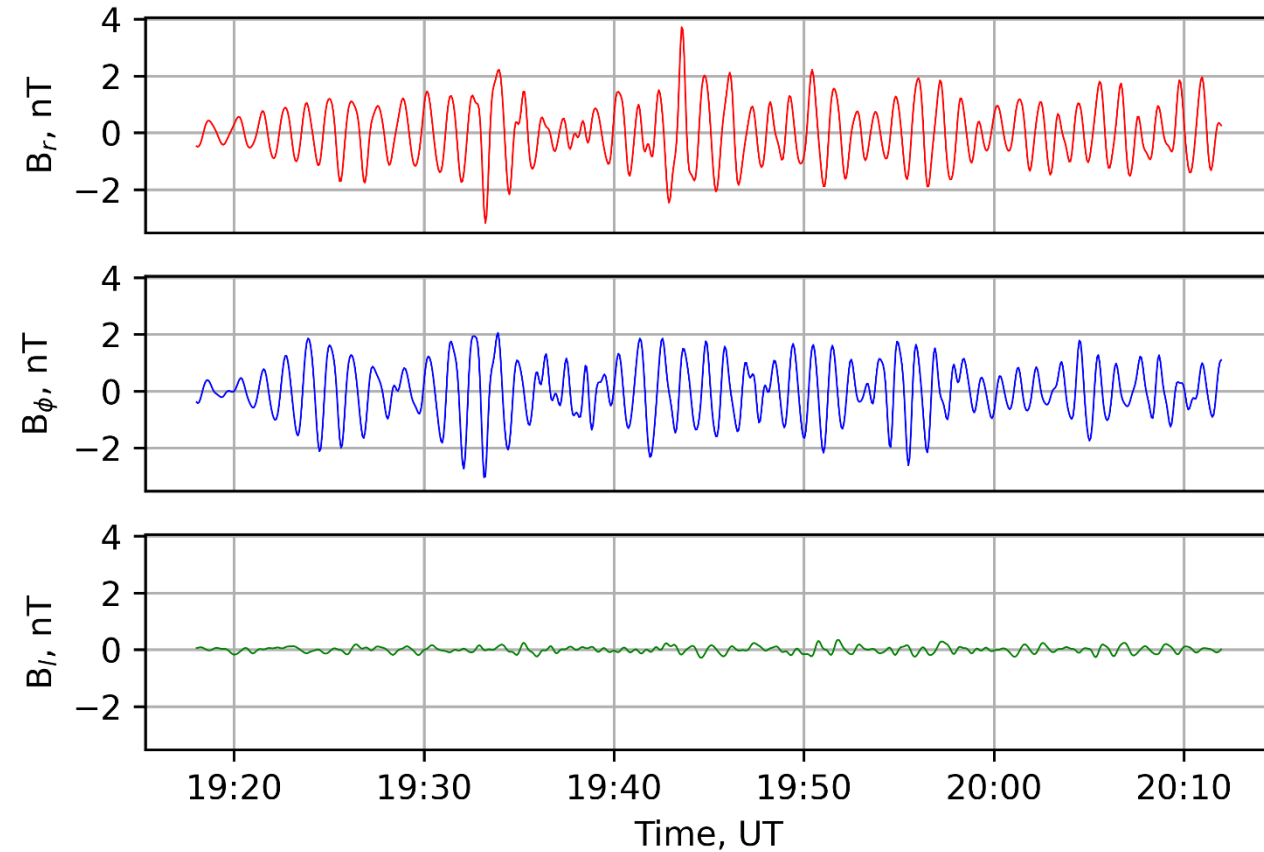
Пример №1: волна с меняющейся поляризацией



области непрозрачности

Пример №2: **полоидальный** резонатор

23 October 2012



Согласно теории – чем выше число переходов через нуль, тем выше номер собственной гармоники резонатора. Стоит отметить, что здесь ниже частота --> выше номер гармоники.

SAR-дуги

Стабильные красные авроральные дуги (stable auroral red arcs) – сияния **красного** цвета на длине волны 630 нм.

- Генерируются низкоэнергетичными потоками электронов (примерно 2-5 эВ).
- Доходят даже до средних широт.
- Выше «классических» зелёных сияний.

До сих пор не существует единой гипотезы, которая однозначно описывала бы их генерацию. Среди выдвинутых гипотез можно упомянуть:

- Кулоновские столкновения электронов с ионами кольцевого тока (на расстоянии от 2 до 8 радиусов Земли)
- Резонанс между электронами и ионно-циклотронными волнами (частоты порядка герц)
- Модуляция потоков электронов продольным электрическим полем

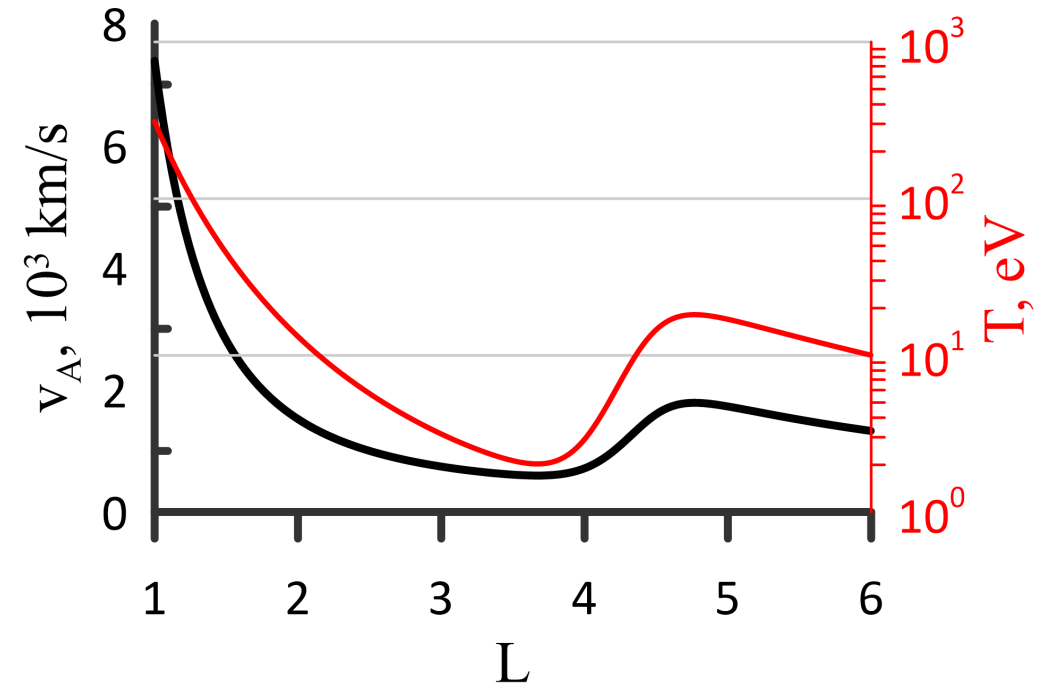


Модель параметров магнитосферы

Ещё одна гипотеза – бесстолкновительное затухание Ландау между электронами фоновой плазмы и т.н. **кинетическими альфвеновскими волнами (КАВ)**. Предложена ещё в 70-ых годах, но не нашла должного развития.

В рамках одной из работ цикла:

- Впервые получен тензор диэлектрической проницаемости плазмы с учётом наличия горячих протонов кольцевого тока;
- Построены модельные параметры плазмы, необходимые для анализа того, где и при каких условиях возникает взаимодействие волна-частица, приводящее к генерации потока электронов **нужных** энергий;
- Оказывается, что учёт горячих протонов кольцевого тока смещает границу взаимодействия ближе к Земле;



Распределение альфвеновской скорости для слабовозмущенной магнитосферы в приэкваториальной области, а также температура электронов, тепловая скорость которых равна альфвеновской скорости (резонансные).

Заключение

Данный цикл работ представляет собой исследование поперечной структуры альфвеновских волн как с помощью магнитной гидродинамики, так и с использованием кинетики. Работы данного цикла:

- Апробируют метод «фазовых портретов», который позволяет исследовать пространственную структуру волны и определять её тип по данным всего одного инструмента на спутнике (например, магнитометра).
- Уточняют модель диссипации кинетических альфвеновских волн и передачу их энергии электронам фоновой плазмы. Это является ещё одним шагом в понимании механизмов генерации SAR-дуг.

Важно: данный цикл работ не завершает исследование вышеупомянутых явлений, а мотивирует продолжать работу. Гипотеза генерации SAR-дуг требует дальнейшей работы, а метод определения пространственной структуры волны и её типа ещё больше примеров использования.

Список работ, входящих в цикл

- ❖ Vlasov A.A. Studying the radial structure of the poloidal Alf-vén resonator by the method of phase portraits from Van Allen Probes satellite data. *Sol.-Terr. Phys.* 2025, vol. 11, iss. 2, pp. 60–68. DOI: 10.12737/stp-112202506.
- ❖ D. A. Kozlov, A. A. Vlasov; Kinetic Alfvén waves in the overlap region between the plasmasphere and ring current. *Phys. Plasmas* 1 October 2025; 32 (10): 102107. <https://doi.org/10.1063/5.0260743>.
- ❖ Daniil A. Kozlov, Anatoly S. Leonovich, Alexander A. Vlasov. Determining the radial structure of high-m Alfvén wave by means of the “phase portrait” method, *Advances in Space Research*, Volume 73, Issue 1, 2024, Pages 624-631, ISSN 0273-1177, <https://doi.org/10.1016/j.asr.2023.08.009>.

СПАСИБО ЗА
ВНИМАНИЕ!

