1. *Авторы*: **Н.С. Артеха, Д.Р. Шкляр, Е.Е. Титова**
2. *Название*: **Генерация медленных необыкновенных волн и спектральные особенности верхнегибридных волн в магнитосфере**
3. *Ссылки на публикации*:
   1) Artekha N.S., Shklyar D.R. Relativistic effects in the interaction of electrons with a slow extraordinary wave // Physics of Plasmas 2026. V. 33. No. 6. 062105. https://doi.org/10.1063/5.0333261
   2) Шкляр Д.Р., Артеха Н.С. Генерация квазиэлектростатических медленных необыкновенных волн каппа-распределением с конусом потерь // Физика плазмы. 2024. Т. 50. С. 1205-1221. https://doi.org/10.31857/S0367292124100063
   3) D.R. Shklyar, E.E. Titova, N.S. Artekha, Generation of UHR Waves as Inferred from Wave and Electron Flux Measurements by Van Allen Probes // Journal of Geophysical Research: Space Physics. 2025. V. 130. No. 6. e2025JA033815. https://doi.org/10.1029/2025JA033815
4. *Общая формулировка научной проблемы и её актуальность*:

Одним из наиболее распространённых волновых явлений в околоземной плазме являются медленные необыкновенные (МН) волны, к которым относятся также верхнегибридные волны. Важными особенностями верхнегибридных волн являются их достаточно высокая интенсивность и довольно узкая спектральная ширина. Если распределение электронов неустойчиво, то есть обладает свободной энергией, МН волны возбуждаются за счёт кинетической энергии резонансных частиц. Особенность верхнегибридных волн заключается в том, что их интенсивность значительно возрастает, когда верхнегибридная частота становится кратной электронной гирочастоте. Практический интерес к данной теме включает интерпретацию этих экспериментальных фактов и моделирование плазменных процессов. Актуальность темы связана с необходимостью обработки и анализа данных по измерениям волн и частиц, получаемых на спутниках.

5. *Конкретные решаемые в работе задачи и их значение*:

- моделирование распределения частиц на основе данных спутников Van Allen Probes по дифференциальным потокам энергичных частиц;
- вычисление инкремента неустойчивости квази-электростатических медленных необыкновенных волн в предположении, что функция распределения энергичных электронов имеет вид каппа-функции с конусом потерь;
- исследование зависимости полученного инкремента от параметров функции распределения горячих частиц плазмы;
- анализ механизма генерации медленных необыкновенных волн, в частности, получение с учётом релятивистских эффектов выражения для инкремента, справедливого при любом угле распространения и для любой связи между частотой волны и электронной гирочастотой;
- исследование механизма генерации верхнегибридных волн, в частности, прояснение, могут ли эти волны возбуждаться посредством резонансного взаимодействия с энергичными электронами на циклотронных резонансах высокого порядка;
- сравнение теоретически рассчитанного локального инкремента со спектром волн, измеренным спутниками Van Allen Probes.

Анализ резонансного взаимодействия волн и частиц имеет большое значение для интерпретации спутниковых данных, а также для описания свойств распространяющихся волн и механизмов ускорения энергичных частиц.

6. *Используемый подход, его новизна и оригинальность*:

Используются общие релятивистские уравнения движения электрона в поле медленной необыкновенной волны и приближение заданного поля для расчёта инкремента. Используется метод усреднения гамильтоновых уравнений, приводящий к приближению

изолированных резонансов. Это позволяет понизить порядок решаемой системы уравнений: перейти от двумерной системы уравнений движения релятивистских электронов в поле квазимонохроматической МН волны и внешнем магнитном поле к одномерной. Это существенно упрощает решение задачи, уменьшает объём численных вычислений. Используется закон сохранения энергии и закон сохранения фазового объёма для вычисления инкремента МН волны, распространяющейся под произвольным углом к внешнему магнитному полю. Для количественных расчётов используется дипольная модель внешнего магнитного поля и гиротропная модель плотности холодных частиц. В предположении, что возбуждение верхнегибридных волн обусловлено циклотронным взаимодействием с энергичными электронами на высоких циклотронных резонансах, был рассчитан линейный инкремент этих волн. Для этого была смоделирована функция распределения энергичных электронов с помощью каппа-распределения с конусом потерь и температурной анизотропией; параметры этого распределения выбраны на основе спутниковых измерений потоков энергичных электронов.

7. *Полученные результаты и их значимость*:

Выведены общие уравнения движения релятивистских электронов в поле МН волны и внешнем магнитном поле. В приближении изолированных резонансов уравнения движения сведены к одномерной системе уравнений. Получено выражение для инкремента МН волны, применимое для всех частот и углов волновой нормали МН волн. Рассчитан инкремент МН волн в плазме с каппа-распределением при наличии конуса потерь и исследована его зависимость от параметров плазмы и параметров функции распределения. Обнаружено, что максимум инкремента достигается на частотах и при углах волновой нормали, близких к резонансным значениям вблизи верхнегибридной частоты и для углов волновой нормали, близких к $\pi/2$. Обнаружено, что зависимость инкремента от относительной частоты имеет квазипериодический характер, причём максимумы инкремента достигаются вблизи гармоник гирочастоты. Это связано с тем, что в этом случае резонансный импульс, соответствующий n-ому циклотронному резонансу, имеет минимальное по абсолютной величине значение, и вклад в инкремент от этого резонанса доминирует над вкладами от других циклотронных резонансов. Поскольку верхнегибридные волны имеют относительно малую групповую скорость, эффект распространения не должен играть важной роли в эволюции спектра этих волн. Таким образом, спектр, наблюдаемый в данной точке, должен быть тесно связан с инкрементом волны в этой же точке. Был рассчитан линейный инкремент верхнегибридных волн вдоль траектории спутника Van Allen Probe с использованием зарегистрированных параметров плазмы и плотности энергичных электронов, выведенной из дифференциальных измерений потока. Помимо плотности горячей плазмы, использовались другие параметры модельного распределения, совместимые с измерениями потока, но не выведенные из них. Объяснены особенности спектров верхнегибридных волн, наблюдаемых на спутниках в магнитосфере Земли, в частности, заметное возрастание спектральной интенсивности верхнегибридных волн в областях, где частота верхнегибридного резонанса кратна электронной циклотронной частоте. Предлагаемое объяснение этих наблюдений основано на предположении, что верхнегибридные волны возбуждаются вследствие развития циклотронной неустойчивости на высоких циклотронных резонансах. Вычисленный инкремент верхнегибридных волн вдоль траектории спутника хорошо согласуется с одновременными наблюдениями спектра. Сравнение теоретически рассчитанного локального инкремента и спектрограмм, измеренных спутниками Van Allen Probes, проведено для большого количества экспериментальных данных. Прямое соответствие наблюдаемого спектра и локального инкремента волн является сильным аргументом в пользу предложенного механизма их генерации.