

Цикл работ Федотовой Марии Андреевны «Волновые процессы во вращающихся стратифицированных течениях астрофизической плазмы», представленный на конкурс научных работ ИКИ РАН в номинации молодых ученых:

1. М. А. Федотова, Д. А. Климачков, А. С. Петросян, *Магнитогидродинамическая теория мелкой воды для течений стратифицированной вращающейся астрофизической плазмы. Приближение бета-плоскости, магнитные волны Россби*, Физика Плазмы Т.46, №1, с 57-71, 2020.  
<https://sciencejournals.ru/view-article/?j=fizplaz&y=2020&v=46&n=1&a=FizPlaz2001007Fedotova>
2. М. А. Федотова, А. С. Петросян, *Волновые процессы в трехмерных стратифицированных течениях вращающейся плазмы в приближении Буссинеска*, ЖЭТФ Т.158, вып.2(8), с 374-394, 2020. <http://www.jetp.ac.ru/cgi-bin/r/index/r/158/2/p374?a=list>
3. М. А. Федотова, А. С. Петросян, *Волновые процессы во вращающихся сжимаемых течениях астрофизической плазмы с устойчивой стратификацией*, ЖЭТФ Т. 158, №6, с 1188-1214, 2020. [http://www.jetp.ac.ru/cgi-bin/dn/r\\_158\\_1188.pdf](http://www.jetp.ac.ru/cgi-bin/dn/r_158_1188.pdf)
4. Fedotova M., Klimachkov D., Petrosyan A., *Variable density flows in rotating astrophysical plasma. Linear waves and resonant phenomena*. Universe T. 7, №4, с 87-128, 2021. <https://www.mdpi.com/2218-1997/7/4/87/htm>

#### **Общая формулировка научной проблемы и ее актуальность:**

Цикл работ посвящен теоретическому исследованию эффектов стратификации и сжимаемости в течениях вращающейся астрофизической плазмы. Исследования эффектов стратификации и сжимаемости в магнитогидродинамических моделях вращающейся астрофизической плазмы важен для анализа процессов в солнечном тахоклине, устойчиво-стратифицированных областях в недрах звезд (излучающей зоны) и планет (внешний жидкий слой ядра), осцилляций вращающихся звезд и Солнца, астрофизических дисков, экзопланет. Свойство сжимаемости является принципиальным отличием течений астрофизической плазмы и характеризует большинство наблюдаемых объектов в астрофизике. Кроме того, учет стратификации позволяет существенно расширить возможности для интерпретации имеющихся данных наблюдений крупномасштабных волн Россби на Солнце.

#### **Конкретная решаемая в работе задача и ее значение:**

Развитие аналитической теории, описывающей линейные и нелинейные волны в плазменной астрофизике: обоснование и разработка различных приближений для магнитогидродинамических уравнений, описывающих эффекты стратификации и сжимаемости в течениях вращающейся астрофизической плазмы; поиск новых типов волн, вызванных непосредственно изучаемыми эффектами; исследование влияния изучаемых эффектов, а также учета горизонтальной составляющей силы Кориолиса на магнитоастрофизические волны, магнитные инерционно-гравитационные волны и волны магнито-Россби; качественный анализ потенциальных нелинейных взаимодействий для всех исследуемых типов волн и вывод уравнений трехволновых взаимодействий; исследование влияния стратификации и сжимаемости на инкременты параметрических неустойчивостей, а также новые механизмы параметрических неустойчивостей с учетом новых типов волн.

Решаемая в цикле работ задача описывает качественное поведение и общие свойства течений в плазменной астрофизике и является основой для развития численных моделей пространственно-временной изменчивости различных астрофизических объектов.

#### **Используемый подход, его новизна и оригинальность:**

Линейная и нелинейная теория волн магнито-Россби в двумерных течениях астрофизической плазмы развиты на основе полученной принципиально новой системы магнитогидродинамических уравнений в приближении двуслойной мелкой воды во внешнем магнитном поле. Полученные уравнения мелкой представляют собой единственную возможность самосогласованного учета внешнего магнитного поля и стратификации в теории мелкой воды. Важным достижением в исследовании течений вращающейся астрофизической плазмы стало исследование волновых процессов

в трехмерной магнитогидродинамической системе в приближении Буссинеска и использование четырех различных приближений силы Кориолиса: стандартной и нестандартной (с учетом горизонтальной компоненты вектора Кориолиса)  $f$ -плоскости, стандартной и нестандартной бета-плоскости. Для сжимаемых стратифицированных течений получена новая система магнитогидродинамических уравнений в неупругом приближении, которая, в отличие от используемых ранее уравнений в неупругом приближении, объединила в себе вращение, сжимаемость и наличие постоянного магнитного поля в стационарном состоянии. Для исследования нелинейных эффектов во всех работах цикла используется метод многомасштабных разложений.

### **Полученные результаты и их значимость:**

Развита теория волн магнито-Россби в стратифицированных течениях в модели двуслойной мелкой воды. Получена система магнитогидродинамических уравнений вращающейся астрофизической плазмы в приближении двух слоев плазмы различной, но постоянной плотности. Найдены различные дисперсионные соотношения для волн магнито-Россби с поправками, связанными с различием плотностей слоев.

Развита теория волновых процессов в магнитогидродинамических течениях вращающейся астрофизической плазмы в приближении Буссинеска для четырех различных приближений силы Кориолиса:  $f$ -плоскости, нестандартной  $f$ -плоскости, бета-плоскости и нестандартной бета-плоскости. В каждой из четырех систем найдены решения в виде различных типов волн: магнитные инерционно-гравитационные, магнитострофические и волны магнито-Россби.

Развита теория сжимаемых течений вращающейся астрофизической плазмы. Получена система магнитогидродинамических уравнений для вращающейся астрофизической плазмы в неупругом приближении (также для четырех приближений силы Кориолиса). В рамках полученных уравнений найдены различные типы волн, в дисперсионных соотношениях которых присутствуют слагаемые, описывающие сжимаемость течений.

Во всех описанных выше моделях развита нелинейная теория волн, выведены амплитудные уравнения трехволновых взаимодействий и найдены параметрические неустойчивости.

Последняя статья цикла является обзором различных методов учета эффектов стратификации и сжимаемости во вращающихся течениях астрофизической плазмы. В нем приведены результаты первых трех работ цикла, а также работы Климачкова Д.А. по исследованию волновых процессов во вращающейся плазме с учетом крупномасштабной сжимаемости. В работе показано отличие в моделях и их применимости, а также в полученных дисперсионных соотношениях для волн магнито-Россби, магнитострофических и магнитных инерционно-гравитационных волн.

Полученные системы уравнений имеют большое значение для улучшения и развития численных моделей различных явлений и процессов во вращающейся астрофизической плазме. Учет горизонтальной составляющей силы Кориолиса особо актуален для экваториальных течений. Полученные дисперсионные уравнения различных новых типов волн повышают точность реальных течений с устойчивой стратификацией, присутствующих излучающей зоне звезд, солнечном тахоклине и внешнем жидком слое ядра планет. Также учет сжимаемости в магнитогидродинамических моделях вращающейся плазмы существенно повышает возможность интерпретации астросейсмологических данных, например, данных о широтной зависимости собственных мод солнечных осцилляций. Различные дисперсионные соотношения для волн магнито-Россби позволяют расширить возможности интерпретации данных наблюдений, что имеет большое значение для исследований в области космической погоды.