

## **Аннотация серии работ на конкурс работ молодых ученых ИКИ РАН 2019 года**

### **Авторы:**

Юшков Е.В. (соавторы А.С. Лукин, Д.Д. Соколов, П.Г. Фрик)

### **Название серии работ:**

Влияние спиральности случайного потока на подавление самогенерации магнитного поля

### **Ссылки на публикации:**

- 1) E. Yushkov, A. Lukin, D.Sokoloff, P.Frick (2019) The small-scale dynamo in a spectral representation, *GAFD*, 113 (1), DOI 10.1080/03091929.2018.1554103
- 2) Е.В. Юшков, А.С. Лукин, Д.Д. Соколов (2019) Подавление мелкомасштабной генерации магнитного поля при трансформации спектра кинетической энергии турбулентного потока, *ЖЭТФ*, 156 (5), DOI 10.1134/S0044451019110000
- 3) Е.В. Юшков, А.С. Лукин, Д.Д. Соколов (2019) Докритическое мелкомасштабное динамо в спиральном случайном потоке, *ЖЭТФ*, 155 (6), DOI 10.1134/S0044451019060178
- 4) E.V. Yushkov, D.D. Sokoloff (2018) Geomagnetic reversals and dynamo bursts in a simple geodynamo model, *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 54(4), DOI 10.1134/S1069351318040122

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

В нелинейной теории мгд-динамо магнитной спиральности отводится одна из ведущих ролей. Гипотеза о том, что ее баланс в турбулентном каскаде приводит к стабилизации магнитной самогенерации, неоднократно проверялась в численных экспериментах. Однако даже самые грубые оценки насыщенной магнитной энергии, полученные из идеи баланса спиральности, для астрофизических объектов (звезд, планет и галактик) приводят к расхождениям на порядки с наблюдаемыми данными. Рабочей гипотезой о том, что является причиной этого несоответствия, является нарушение баланса спиральности из-за неучета ее генерации на малых масштабах. Так как большинство моделей динамо среднего поля базируется на усреднении мгд уравнений на расстояниях больших чем корреляционная длина случайного поля скорости, то стандартные модели не могут учесть процессы самогенерации вблизи диссипативных масштабов. В то же время для течений специального вида разработаны модели типа Казанцева, которые позволяют доказать возможность активной генерации мелкомасштабной спиральности. В представляемой серии работ изучаются свойства такой генерации в критических и докритических режимах. Исследуется ее перенос по спектру, как наиболее вероятная причина “корректной” стабилизации магнитного динамо. Актуальность проблемы связана как с фундаментальными знаниями о формировании крупномасштабных магнитных полей, так и с прикладными проблемами будущего, связанными с подавлением шумовой самогенерации магнитных полей в жидкометаллической и плазменной технике.

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

В выдвигаемой на конкурс серии четырех работ исследуется ряд вопросов, направленных на выяснение роли зеркальной асимметрии случайного течения (спиральности) на механизм работы мелкомасштабного динамо. Во-первых, изучается возможность работы турбулентной самогенерации в дельта-коррелированном по времени спиральном потоке плазмы. Находится порог магнитного числа Рейнольдса, с которого начинается генерация. Проводится анализ влияния на пороговые значения генерации корреляционных свойств потока. Анализируется спектр магнитной энергии на линейном режиме и возможность генерации магнитной спиральности на малых масштабах. Во-вторых, проводится численный эксперимент, направленный на изучение магнитной самогенерации в докритическом режиме, фиксируется и изучается эффект Зельдовича для докритического роста магнитной энергии. Ставится задача об обратном влиянии генерируемого магнитного поля на кинетические свойства турбулентного потока (другими словами, исследуется нелинейная фаза процесса мгд-динамо). В третьих, как для гауссовой корреляционной функции, так и для квази-колмогоровского спектра исследуется взаимосвязь между генерацией, величиной инерционного интервала и формой спектра. Проводится анализ возможности магнитной самогенерации при нарушении дельта-коррелированности течения и при прочих отклонениях от предположений Казанцева. Наконец, на примере простейшей модели типа Паркера исследуется влияние знака спиральности и нелинейных эффектов альфа-

квенчинга на возможность появления интервалов монотонной стабилизации, осцилляции и спонтанной инверсии крупномасштабного магнитного поля земного типа.

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

Модели, лежащие в основе представляемого анализа мелкомасштабных процессов, строятся на подходе Казанцева. При этом подходе уравнение магнитной индукции усредняется по случайному полю скорости с фиксированными корреляционными свойствами. Ключевым “идеализированным” свойством является дельта-коррелированность по времени турбулентного течения, которое, однако, может быть обобщено на конечные временные корреляции (равные на разных масштабах, что также является расхождением с колмогоровской турбулентностью). Основной рабочей системой, описывающий корреляционный тензор генерируемого магнитного поля в данном случае, является система Вайнштейна-Кичатинова (в литературе также носит название системы Казанцева, системы Крейчнана), которая решается численно на неравномерной сетке или аналитически с помощью асимптотического подхода, завязанного на малость масштаба корреляций магнитного поля по сравнению с корреляционной длиной поля скорости. По корреляционным свойствам магнитного поля восстанавливаются спектры магнитной энергии и спиральности для дальнейшего анализа и для учета в крупномасштабных моделях типа Штеенбека-Краузе-Рэдлера и Паркера. При этом предполагается, что всё нелинейное влияние происходит достаточно медленно, поэтому линейная модель турбулентной самогенерации принципиально не меняется, а меняются только входные параметры, связанные с полем скорости. Предложенный подход базируется на классических и признанных идеях, однако данное направление является мало изученным в связи с бытовавшим ранее мнением, что генерируемые вблизи диссипативного масштаба поля оказываются малыми и их влиянием можно пренебречь. Однако согласно последним данным по переносу магнитной спиральности от малых масштабов к энергонесущим (каскадная модель П.Г.Фрика) данное мнение являлось ложным из-за эффективно генерируемой магнитной спиральности на малых масштабах и ее обратного каскада.

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

В выдвигаемой на конкурс серии работ получены следующие результаты: доказана возможность генерации магнитной энергии и спиральности в зеркально асимметричном турбулентном течении плазмы при больших магнитных числах Рейнольдса, получены оценки критического порога генерации, изучены спектральные характеристики генерируемой энергии и спиральности, исследовано влияние кинетических свойств потока на процесс самогенерации, изучена возможность стабилизации быстрой генерации при деформации кинетического спектра, изучен докритический режим генерации, доказан эффект Зельдовича. Подробно показано, как происходит разделение по знаку спиральности на малых масштабах, и какие эффекты могут быть связаны с обратным каскадом спиральности из диссипативной области в энергонесущую. На основании вмороженности поля выдвинута гипотеза об обратном влиянии генерируемого магнитного поля (и спиральности) на кинетические свойства среды и форму энергетического спектра. Изученная взаимосвязь между кинетическими свойствами и генерацией поля показала, что мелкомасштабная генерация может стабилизироваться исключительно за счет увеличения инерционного интервала квази-колмогоровского спектра при сохранении полной энергии. Удалось явно продемонстрировать, какие именно черты спектра следует искать в численных и лабораторных экспериментах, чтобы зафиксировать работу мелкомасштабного динамо (этот результат является тем более важным, что в 2019 году впервые работа турбулентного динамо была зафиксирована, см. подробнее 2019NatureCommunications\_Tzeferacos). Удалось показать, что даже в докритическом режиме, когда устойчивой генерации во времени не происходит, может наблюдаться локальный рост энергии, если изначальная характерная корреляционная длина магнитного поля больше корреляционной длины поля скорости. При этом удалось получить оценки на время и скорость такого локального нарастания, что является важным в силу того, что при малых скоростях такой докритический рост вполне может наблюдаться в производстве и технике, работающей с вмороженными в случайные потоки магнитными полями. Наконец, на примере простейшей динамо-модели для поля земного типа удалось показать что квенчинг спиральности и смена ее знака (как раз то что было продемонстрировано на малых масштабах), может приводить не только к чередованию монотонной стабилизации поля и осцилляции, но также и к спонтанным инверсиям, что является типичным для магнитного диполя Земли.