

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СОЛНЕЧНОЙ КОНВЕКЦИИ: ТЕОРИЯ СРЕДНЕГО ПОЛЯ И (ПЯТИ-МИНУТНЫЕ) КОЛЕБАНИЯ?

Кузанын К.М.^{1,2}, Клиорин Н.^{1,2,3}, Рогачевский И.³

¹ИЗМИРАН, Москва, Россия

²ИМСС УрО РАН, Пермь, Россия

³Университет Бен-Гуриона, Беэр-Шева, Израиль
kuzanyan@gmail.com, nat@bgu.ac.il

С целью изучения фундаментальных свойств развитой турбулентности в конвективной ячейке была проведена серия модельных экспериментов с Рэлей-Бенаровской конвекцией в прямоугольной ячейке при числах Рэля порядка $10^8 - 10^9$ в воде с равномерно нагретой нижней твердой границей и открытой верхней поверхностью с квазистационарным тепловым потоком. Лабораторные измерения с использованием метода PIV (и стерео-PIV) позволяют исследовать длинные временные ряды для накопления статистических данных. Кроме того, численное моделирование DNS дает трехмерные векторные поля скорости и температуры с высоким разрешением. Мы сравнили экспериментальные и численные результаты в перекрывающемся диапазоне параметров: лабораторные эксперименты с воздухом (Беэр-Шева), водой (Пермь), численные эксперименты DNS и расчеты в рамках теории среднего поля. Продемонстрирована возможность формирования крупномасштабных долгоживущих конвективных ячеек. В значительной части вычислительного домена была обнаружена область устойчивой стратификации (положительный градиент температуры) за исключением приповерхностного и придонного слоев, что согласуется с расчетами в рамках теории среднего поля и лабораторными экспериментами с воздухом в Беэр-Шеве.

Обнаружено, что в случае относительно малых чисел Рейнольдса почти всегда существуют медленные по сравнению с турбулентностью колебания, по-видимому связанные с устойчивой стратификацией в части исследуемой области. Этот эффект известен для атмосферной конвекции, но для астрофизических приложений он недостаточно исследован, поскольку теория длины пути перемешивания в принципе не может дать подобного градиента температуры из-за отсутствия в ней структур, отделенных от турбулентности. Наши результаты имеют два важных следствия для физики Солнца. Одно касается обоснования метода построения крупномасштабной картины солнечной активности, связанной с солнечным циклом, из отдельных записей солнечных пятен и магнитограмм активных областей. Примером этого является известная диаграмма бабочек Маундера для солнечных пятен, формирующая крупномасштабную картину с типичным временем порядка периода солнечного цикла ~ 11 лет и типичным пространственным масштабом солнечного полушария ~ 100 Мм. В то же время пространственная протяженность отдельных солнечных пятен составляет порядка $\sim 3-10$ Мм, а типичное время порядка нескольких дней. Перед использованием данных для построения диаграмм бабочек используются средние значения (скользящее среднее по солнечной широте и времени) в масштабах солнечных пятен или групп солнечных пятен. Затем данные сглаживаются по масштабу одного крыла бабочки. Другое следствие - возможное сосуществование конвективных течений, фоновой турбулентности (грануляции) и внутренних гравитационных волн в зоне солнечной конвекции. Его возможное проявление - это 3-5 минутные колебания на Солнце в области с субадиабатическим градиентом температуры по крайней мере в части солнечной конвективной зоны. (Грант РФФ 21-72-20067П).