

ИССЛЕДОВАНИЯ ГИДРОДИНАМИКИ ТЕПЛОВОЙ КОНВЕКЦИИ ВО ВРАЩАЮЩЕЙСЯ АТМОСФЕРЕ

Агеев Сергей Сергеевич

Шаплуков Дмитрий Яковлевич

Ефременко Андрей Андреевич

студент

ФГБОУ ВО «Калмыцкий государственный университет им. Б.Б. Городовикова», г. Элиста

Аннотация. В данной статье представлены некоторые проблемы, связанные с решением уравнений гидродинамики атмосферы небесных тел, планет-гигантов и звезд в рамках нетрадиционного приближения уравнений движения (баланса импульса) по отношению к компонентам силы Кориолиса. Рассматривается теория конвекции, объясняющая структуру зональной струи во всех ее деталях.

Ключевые слова: Тепловая конвекция во вращающейся атмосфере, внутренние гравитационные волны в приближении нетрадиционной бета-плоскости.

Актуальность. Исследования обусловлены тем, что в настоящее время уравнения геофизической гидродинамики (динамики атмосферы и океана) записываются в рамках традиционного приближения. Суть такого приближения сводится к тому, что в уравнениях движения (баланса импульса) пренебрегается компонентой силы Кориолиса, пропорциональной косинусу широты места. Практическая необходимость такого приближения связана с тем, что при таком приближении переменные в уравнении разделяются, и становится возможным их аналитическое решение. В то же время очевидно, что эти две компоненты силы Кориолиса на средних широтах являются одного порядка. Поэтому пренебрегать одной из составляющей силы Кориолиса, в общем, не корректно.

Задачи исследования. Мы можем выделить три ключевых элемента, связанные с использованием нетрадиционного параметра Кориолиса, с которыми мы будем обсуждать в этом обзоре. Во-первых, решающую роль вертикальных движений, которые ответственны за компоненту силы Кориолиса вдоль параллели. И, во-вторых, наоборот, компонента скорости, направленная вдоль параллели, ответственная за вертикальную компоненту силы Кориолиса. И в-третьих, наклон из-за нетрадиционного параметра Кориолиса между вектором угловой скорости вращения планеты (звезды) и ускорением свободного падения, который является источником неразделимости переменных (то есть, появляются смешанные пространственные производные в главном уравнении в частных производных).

Небесные тела, вращающиеся газовые планеты-гиганты и звезды, обычно имеют обширные конвективные оболочки внутри, создаваемые внутренним нагревом (а иногда и химическими реакциями). Без вращения эта конвекция была бы типа Рэлея – Бенара со сферической симметричной структурой конвективных валов, которые переносят внутреннее генерируемое тепло наружу. При сильном вращении эта картина резко меняется. Вращение нарушает сферическую симметрию в том смысле, что конвективные валы имеют тенденцию выравниваться с осью вращения, образуя столбы Тейлора – Праудмана [Taylor, 1923]. Veronis (Веронис) [1959] показал, что на вращающейся плоскости ограничение Тейлора – Праудмана приводит к столбчатым ячейкам, в которых конвективный поток движется по спирали вверх и вниз [Chandrasekhar (Чандрасекхар), 1961].

Наличие нетрадиционного параметра Кориолиса имеет два важных следствия. Во-первых, он вводит смешанную производную, тем самым изменяя характер уравнения в частных производных; во-вторых, это делает роли сил вдоль параллели и меридиана несхожими, что подразумевает анизотропию в горизонтальной плоскости. Оба эффекта исчезают при традиционном приближении. Сильная стратификация, когда циклическая частота плавучести намного больше удвоенной циклической частоты вращения планеты, не влияет на присутствие смешанной производной. Филлипс [1968] уже указывал, что нетрадиционный параметр Кориолиса «может значительно войти в более тонкие детали», даже когда циклическая частота плавучести намного больше удвоенной циклической частоты вращения планеты.

Если циклическая частота плавучести изменяется с высотой, то неоднородность среды вызывает внутренние отражения, поэтому энергия волны больше не остается на той же характеристике внутри жидкости. Однако если жидкость содержится между двумя горизонтальными границами (ровное дно внизу и «жесткая крышка» сверху), решение может быть получено в терминах вертикальных мод для произвольной циклической частоты плавучести.

Хотя традиционное приближение имеет свои корни в геофизической гидродинамике и гораздо реже используется в астрофизической гидродинамике, есть несколько астрофизических объектов, в которых она была принята, прямо или неявно. Это звездные или планетарные (приливные) колебания и их диссипация, и тепловая конвекция.

Внутренняя часть Юпитера состоит из небольшого твердого ядра, обширной водородной оболочки, которую можно разделить на внешнюю молекулярную область и металлическую внутреннюю область, и мелкой тропосферы [Guillot, 2005]. Считается, что конвекция ограничена либо молекулярным слоем с неопределенной глубиной (глубокая конвекция), либо только тропосферой (мелкая конвекция), и что переход от молекулярной оболочки к металлической оболочке является диффузным и, таким образом, недостаточно определенным.

Все, что видно о внутренней деятельности атмосферы Юпитера извне, происходит в неглубокой тропосфере поверх оболочки из молекулярного водорода. Тропосфера содержит характерные для Юпитера облачные полосы.

Эта полосчатая структура является отражением системы приблизительно 30 зональных струй от полюса к полюсу с двукратно остроконечной сильной проградной (т.е. по вращению планеты, не ретроградной) струей на экваторе.

Это приводит к появлению экваториальной проградной струи, поскольку градиент потенциальной завихренности направлен внутрь. Однако его динамика отличается от подхода мелкой воды и от динамики во внешней области в следующих аспектах:

(1) Столбы жидкости перемещаются в радиальном, азимутальном и вертикальном (то есть, вращательном) направлении, при этом ось столбца всегда выравнивается по оси вращения, в отличие от столбцов в приближении «тонкой» оболочки с использованием уравнений мелкой воды в традиционном приближении; поэтому их вертикальная координата не свободна, а задается радиальной координатой (или наоборот).

(2) При этом они движутся в неевклидовом двумерном пространстве вдоль сферической поверхности, как в «тонкой» оболочке, в отличие от колонн в области за пределами цилиндра.

(3) Поскольку столбы жидкости Тейлора, сохраняют свою ось всегда выровненной по оси вращения, их динамика определенно не описывается в традиционном приближении, как это происходит для столбцов в области за пределами касательного цилиндра.

Таким образом, касательный цилиндр в нескольких смыслах является особой границей: он разделяет внешнюю область с поперечно-экваториальными столбами из двух отдельных полярных внутренних областей, каждая из которых имеет градиент потенциальной завихренности, противоположный градиенту внешней области, и каждый из которых имеет метрику, отличную от внешней области.

Теория конвекции должна в конечном итоге объяснить структуру зональной струи во всех ее деталях (продольная экваториальная струя, ее амплитуда и ширина, а также число, ширина и амплитуда меньших струй в более высоких широтах).

Как уже было отмечено, не очень хорошо известно, насколько глубоким является конвективный слой Юпитера. Если мы сначала предположим, что все внутреннее пространство находится в конвективном состоянии, что, конечно, не так, то существует сходство в динамике глубокой турбулентной конвекции в сфере с турбулентностью мелкой воды на сфере. В сфере, согласно теореме Тейлора – Праудмана, вся конвекция считается столбчатой с осями вращения в направлении оси вращения.

Таким образом, эта картина, в основном, описывается в нетрадиционном приближении. Более того, метрика пространства, в котором столбы перемещаются, т.е. экваториальная

плоскость, является евклидовым пространством, в отличие от такового в уравнениях мелкой воды на сфере. Положение столба задается только радиальной и азимутальной координатами, а его высота определяется радиальной координатой из-за жесткой по предположению сферической поверхности, окружающей жидкость.

Работа выполнена под научным руководством доктора физико-математических наук, профессора Закиняна Р.Г.

Список литературы:

1. Chandrasekhar, S. (1961), Hydrodynamic and Hydromagnetic Stability, 652 pp., Oxford Univ. Press, Oxford, UK
2. Gerkema T., L. R. M. Maas, H. van Haren, and J. T. F. Zimmerman. (2008). Geophysical and Astrophysical Fluid Dynamics Beyond the Traditional Approximation. Reviews of Geophysics, 46, RG2004.
3. Guillot, T. (2005), The interiors of giant planets: Models and outstanding questions, Annu. Rev. Earth Planet. Sci., 33, 493–530
4. Phillips, N. A. (1968), Reply, J. Atmos. Sci, 25, 1155–1157.
5. Proudman, J. (1948), The applicability of Laplace's differential equations of the tides, Int. Hydrogr. Rev., 25(2), 122–129.
6. Taylor, G. I. (1923), Experiments on the motion of solid bodies in rotating fluids, Proc. R. Soc. London, Ser. A, 104, 213–218.
7. Veronis, G. (1959), Cellular convection with finite amplitude in a rotating fluid, J. Fluid Mech., 5, 401–435.