

ОБЪЕДИНЕННАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМО И ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ВРАЩЕНИЯ

¹А.А. Непомнящих, ^{1,2}Л.Л. Кичатинов

¹Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск Россия

^{1,2}Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия
nep_a@iszf.irk.ru

A JOINED MODEL FOR SOLAR DYNAMO AND DIFFERENTIAL ROTATION

¹A.A. Nepomnyashchikh, ^{1,2}L.L. Kitchatinov

¹Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia

^{1,2}Pulkovo Astronomical Observatory, St. Petersburg, Russia

Аннотация. Развита модель солнечного динамо согласованная по используемым в ней крупномасштабным течением и численным методам с моделью дифференциального вращения. Турбулентная диффузия магнитного поля выражена через градиент энтропии, который определяется уравнениями модели. Значение магнитного числа Прандтля и распределение альфа-эффекта по широте определены из требования соответствия расчетных периода цикла активности и экваториальной симметрии магнитного поля наблюдениям. При этом моменты обращения знака полярного поля и широтно-временные распределения полей также приходят в соответствие наблюдениям. Полоидальное поле достигает максимальной величины около 10 Гс в полярных областях. Тороидальное поле в несколько тысяч Гаусс локализовано у основания конвективной оболочки и переносится меридиональным течением к экватору. Модель предсказывает величину около 10^{37} эрг для полной магнитной энергии крупномасштабных полей в конвективной оболочке Солнца.

Ключевые слова: динамо, Солнце: магнитные поля, Солнце: вращение.

Abstract. A model for solar dynamo concerted in the employed global flow and the numerical method with the differential rotation model is developed. The magnetic turbulent diffusivity is expressed in terms of the entropy gradient, which is controlled by the model equations. The magnetic Prandtl number and latitudinal profile of the alpha-effect are specified by fitting the computed period of the activity cycle and the equatorial symmetry of magnetic fields to observations. Then, the times of polar field reversals and time-latitude diagrams of the fields come in agreement with observations as well. The poloidal field has a maximum amplitude of about 10 Gs in polar regions. The toroidal field of several thousand Gauss is localized near the base of the convection zone and transported towards the equator by the meridional flow. The model predicts the value of about 10^{37} erg for the total magnetic energy of large-scale fields in the solar convection zone.

Key words: dynamo, Sun: magnetic fields, Sun: rotation.

Мотивация

Основной причиной объединения моделей дифференциального вращения и динамо были планируемые приложения к звездам. В этом случае, важные для динамо дифференциальное вращение и меридиональная циркуляция уже не могут быть определены из наблюдений. Согласование численных методов двух моделей потребовало переработки модели динамо. Новая модель основана на ее предыдущей версии [Kitchatinov, Olemskoj, 2012], основные физические эффекты которой перешли в новую модель без изменений, но были уточнены с учетом вызванной вращением анизотропии коэффициентов переноса. Имевшиеся неопределенности в величине турбулентной диффузии и широтном распределении альфа-эффекта были устранены из требования соответствия наблюдаемому периоду солнечного цикла и экваториальной симметрии крупномасштабных полей. Соответствие наблюдениям новой модели динамо существенно улучшилось по сравнению с ее предыдущей версией.

Меридиональная циркуляция и дифференциальное вращение определялись из численной модели [Kitchatinov, Olemskoj, 2011]. Полученное в

расчетах меридиональное течение показано на рис. 1. Течение к полюсам на поверхности, глубина обращения направления течения и высокая концентрация экваториального течения к основанию конвективной оболочки соответствуют новейшим данным гелиосейсмологии [Rajaguru, Antia, 2015]. Дифференциальное вращение рис. 2 также соответствует сейсмологическим данным.

В модели динамо используется нелокальная версия альфа-эффекта, известная как механизм Бэбкока—Лейтона, и учитывается турбулентный перенос магнитного поля к основанию конвективной зоны (диамагнитная «накачка»), что важно для моделирования солнечного динамо [Kitchatinov, Olemskoj 2012]. В результате, тороидальное магнитное поле концентрируется у основания зоны конвекции, т.е. модель реализует «придонное» динамо. Основные результаты расчетов показаны на рис. 3 и 4.

Радиальное поле на солнечной поверхности достигает наибольшей величины (~10 Гс) вблизи полюсов и быстро убывает с уменьшением широты в полярных областях [Svalgaard et al. 1978]. В крупномасштабном поле доминирует антисимметричная относительно экватора составляющая, радиальное поле одного полушария имеет противоположные полярности на низких и высоких широтах, и изменение

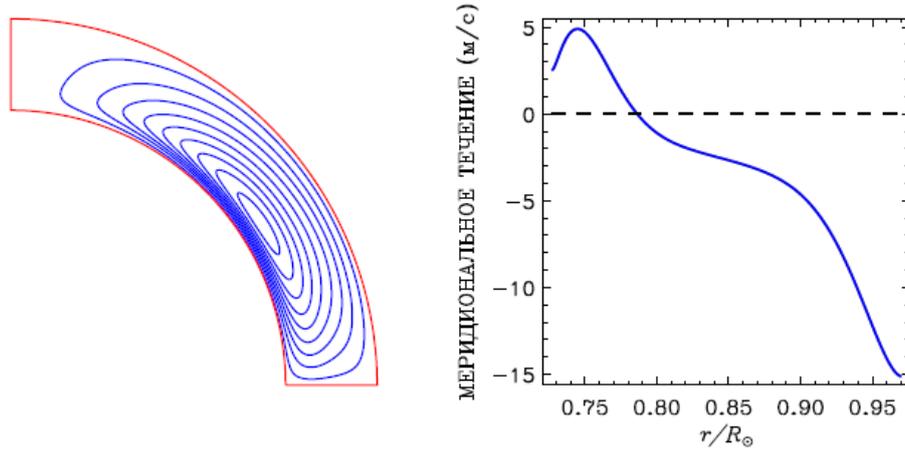


Рис. 1: Линии тока меридионального течения (слева) и зависимость меридиональной скорости от радиуса для широты 45° . Положительная величина скорости означает течение к экватору

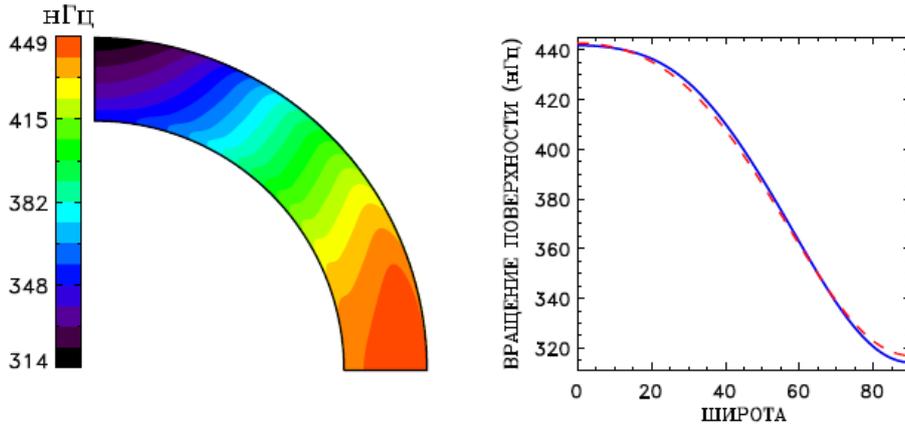


Рис. 2: Дифференциальное вращение по результатам модели: изолинии угловой скорости в конвективной зоне (слева) и зависимость частоты вращения от широты на поверхности. Штриховой линией показаны доплеровские измерения [Howard et al. 1983].

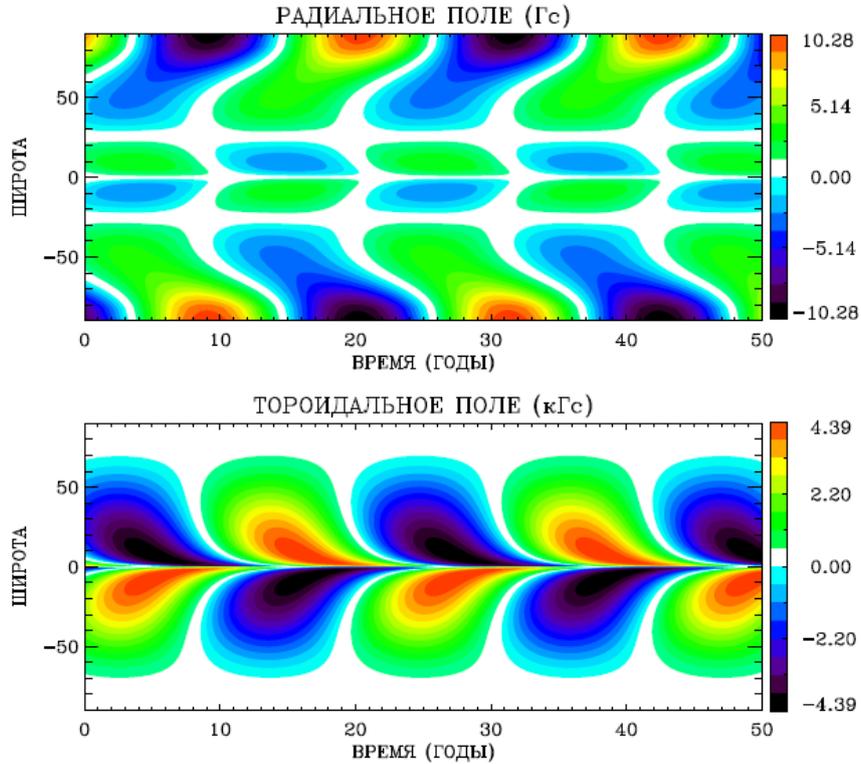


Рис. 3. Широтно-временные диаграммы радиального поля на солнечной поверхности (вверху) и тороидального поля у основания конвективной зоны по расчетам модели динамо

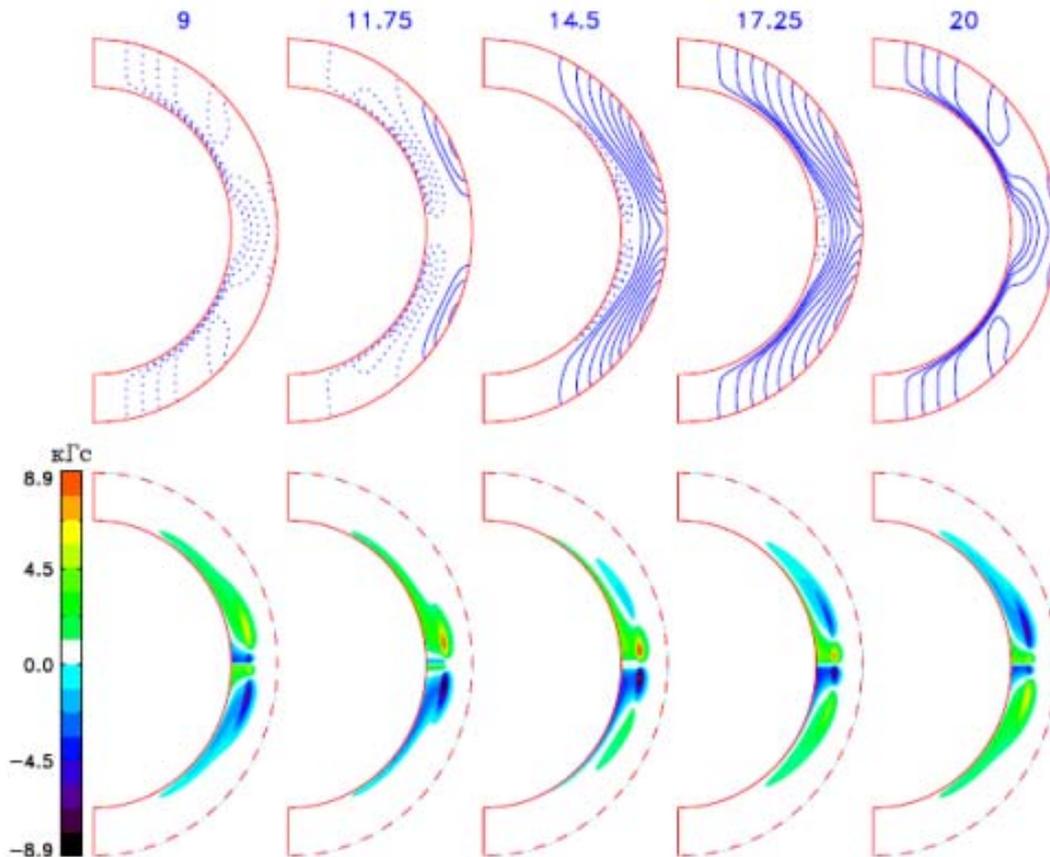


Рис. 4. Линии полоидального поля для той же модели, что и рис. 3 (вверху). Сплошные и пунктирные линии соответствуют циркуляции по часовой стрелке и против. Внизу: распределения тороидального поля. Штриховая линия показывает относительный радиус $r/R_{\odot}=0.85$, ниже которого концентрируется тороидальное поле

знака происходит на широте около 30° [Stenflo 1988; Obridko et al. 2006]. Расчеты, представленные на рис. 3 и 4 воспроизводят все эти наблюдаемые обстоятельства. Из рис. 3 также видно, что тороидальное поле, ответственное за пятнообразовательную активность Солнца, дрейфует в циклах активности к экватору. Это обусловлено экваториальным меридиональным течением у основания конвективной зоны (рис. 1). Напряженность тороидального поля у основания зоны конвекции составляет несколько тысяч Гаусс (рис. 3).

Из широтно-временной диаграммы рис. 3 также видно, что максимальная напряженность тороидального поля (максимальная активность) достигается на низких широтах $\sim 10^{\circ}$ и период цикла близок к 11-и годам. Эти обстоятельства, однако, нельзя отнести к достижениям модели, так как величина турбулентной диффузии $\sim 3 \cdot 10^{13}$ см²/с и широтное распределение альфа-эффекта в ней выбраны из требования соответствия наблюдаемому периоду солнечного цикла и экваториальной симметрии крупномасштабного поля. Таким образом, создана модель динамо, совмещенная с моделью дифференциального вращения, калиброванная по данным наблюдений Солнца, и готовая к применению для подобных Солнцу звезд.

Список литературы

- Howard R. et al. Solar rotation results at Mount Wilson // *Solar Phys.* 1983. V. 83. P. 321–338.
- Kitchatinov L.L., Olemckoy S.V. Differential rotation of main-sequence dwarfs and its dynamo efficiency // *Monthly Notices of the Royal Astron. Soc.* 2011. V. 411, iss. 2, P. 1059–1066.
- Kitchatinov L.L., Olemckoy S.V. Solar Dynamo Model with Diamagnetic Pumping and Nonlocal α -Effect // *Solar Phys.* 2012. V. 276, iss. 1–2. P. 3–17.
- Obridko V.N. et al. Solar cycle according to mean magnetic field data // *Monthly Notices of the Royal Astron. Soc.* 2006. V. 365, iss. 3. P. 827–832.
- Rajaguru S.P., Antia H.M. Meridional circulation in the solar convection zone: time-distance helioseismic inferences from four years of HMI/SDO observations // *Astrophys. J.* 2015. V. 813, iss. 2, article id. 114, 8 p.
- Stenflo J.O. Global wave patterns in the sun's magnetic field // *Astrophys. and Space Sci.* 1988. V. 144, no. 1–2, p. 321–336.
- Svalgaard L. et al. The strength of the Sun's polar fields // *Solar Phys.* 1978. V. 58. P. 225–239.