

УДК 523.98

## Гидродинамическая модель пространственных и временных вариаций полоидальной и тороидальной компонент трехмерных течений на Солнце

А.А. Логинов<sup>1</sup>, О.К. Черемных<sup>1</sup>, В.Н. Криводубский<sup>2</sup>, Н.Н. Сальников<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт космических исследований НАНУ-НКАУ, пр. Академика Глушкова, 40, Киев-22, 03022  
*lesha.loginov@gmail.com*

<sup>2</sup> Астрономическая обсерватория Киевского национального университета им. Тараса Шевченко,  
ул. Обсерваторная, 3, Киев-53, 04053  
*krivod1@observ.univ.kiev.ua*

Поступила в редакцию 20 октября 2011 г.

**Аннотация.** Приведены результаты численного моделирования глобальных течений на Солнце. Сделан вывод о единой гидродинамической природе торсионных колебаний и пространственно-временных вариаций полоидального течения. Показано, что оба эти процесса являются тороидальной и полоидальной компонентами единого гидродинамического асимметричного относительно солнечного экватора колебательного течения. В основе этих процессов лежит физический механизм потери устойчивости дифференциального вращения Солнца.

THE HYDRODYNAMIC MODEL OF SPATIAL AND TEMPORAL VARIATIONS OF POLOIDAL AND TOROIDAL COMPONENTS OF 3D SOLAR FLOWS, *by A.A. Loginov, O.K. Cheremnykh, V.N. Krivodubskij, N.N. Salnikov.* Numerical simulation results of the global solar flows are presented. The conclusion on the common hydrodynamic nature of the torsional oscillations and spatial-temporal variations of the poloidal solar flows was proved. Both processes were shown to be the toroidal and poloidal components of one hydrodynamic asymmetric (with respect to the solar equator) oscillatory flow. The basis for these processes is a physical mechanism of the loss of stability of the solar differential rotation.

**Ключевые слова:** солнечный магнитный цикл, индексы солнечной активности, прогнозы солнечных циклов

---

### 1 Вступление

Как известно, 23-й цикл, к удивлению всех исследователей солнечной активности, кроме основной аномалии – никем не предсказанной существенно удлиненной продолжительности цикла, – был также аномальным и по всем другим характеристикам цикла (см. обзор Криводубского, 2011). Важными характеристиками цикла являются торсионные (крутильные) колебания и меридиональные (полоидальные) течения. Торсионные колебания поверхностных слоев Солнца были открыты в 1980 году в результате анализа доплеровских спектроскопических измерений поверхностных скоростей всего солнечного диска (Ховард и Лабонт, 1980). Позднее с помощью методов глобальной

(Косовичев и Скоу, 1997; Хау и др., 2000) и локальной (Браун и Бирк, 2008) гелиосейсмологии торсионные колебания были идентифицированы в подфотосферных слоях солнечной конвективной зоны (СКЗ). Кроме того, есть указания, что эти колебания могут простираются вглубь вплоть до дна СКЗ (Воронцов и др., 2002; Антия и Басу, 2004). Актуальность изучения торсионных колебаний состоит в том, что активные магнитные области возникают преимущественно на границе между зонами быстрого и медленного вращения поверхностных слоев (Косовичев, 2008).

Немного позже на Солнце была обнаружена вторая компонента глобальных течений – меридиональная (полоидальная) циркуляция вещества. Вначале направленная к полюсам на солнечной поверхности меридиональная циркуляция была обнаружена путем отслеживания движений магнитных структур (Комм и др., 1993; Снодграсс и Дейли, 1996; Нем-Риб и др., 1997), а также прямыми спектральными измерениями доплеровских скоростей (Хэтзуэй, 1996; Хэтзуэй и др., 1996). Позже с помощью методов локальной гелиосейсмологии направленное к полюсу полоидальное течение вещества прослежено до глубин около 30 тыс. км (Джилл и др., 1997). При этом были выявлены сходящиеся полоидальные потоки, сконцентрированные вокруг магнитных активных областей (Жао и Косовичев, 2004; Хабер и др., 2004; Косовичев, 2007, 2008). Последнее может оказывать заметное влияние на перенос магнитных полей в полярные области, что, в свою очередь, может сказываться на процессах переполюсовки общего магнитного поля Солнца. В течение 23-го цикла в направленных к полюсам полоидальных потоках выявлены *локальные возмущения (структуры с повышенной скоростью)*, которые по мере нарастания активности смещались к экватору (Басу и Антия, 2010). Кроме того, возле максимума активности произошло заметное уменьшение скорости направленных от экватора к полюсам полоидальных потоков (Хэтзуэй и Райтмаье, 2010). Отмеченные эффекты полоидального течения ослабляли перенос магнитных полей к полюсам (Джанг и др., 2010) и тем самым могли привести в конце цикла к уменьшению полярных полей и глубокому затяжному минимуму цикла (Ванг и др., 2009; Дикпати, 2011; Нанди и др., 2011).

Таким образом, торсионные колебания и меридиональная циркуляция в последнее время интенсивно привлекаются исследователями для объяснения наблюдаемых флуктуаций солнечной активности. В частности, они играют важную роль в динамо-моделях, ответственных за магнитный цикл Солнца (см. обзор Шарбоно, 2010).

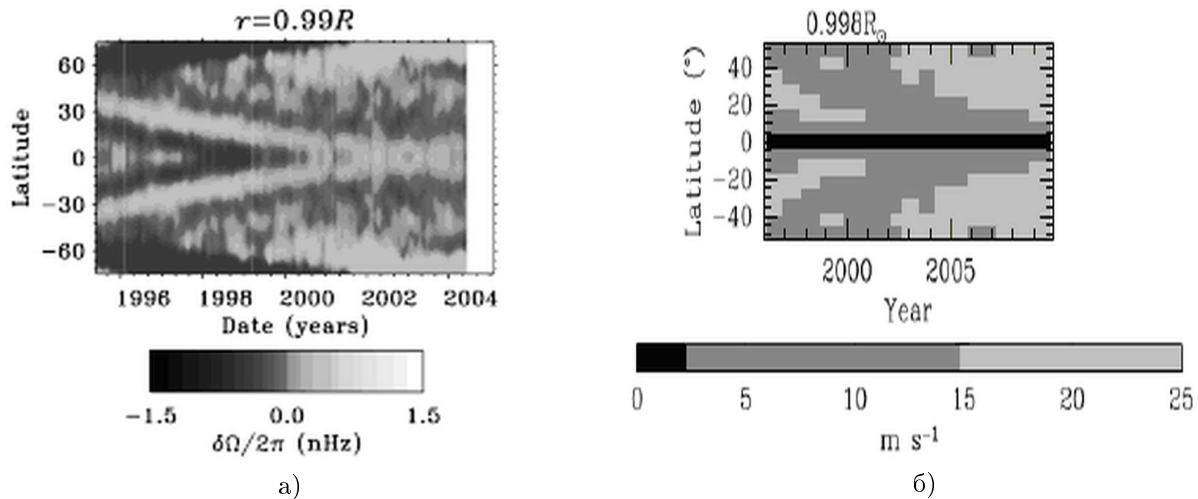
## 2 Физический механизм глобальных течений Солнца

В опубликованной ранее работе (Логонов и др., 2011а) нами была выдвинута гипотеза о гидродинамической природе возникновения глобальных течений на Солнце. Согласно нашей концепции в основе этого явления лежит чисто гидродинамическая неустойчивость вращающейся жидкости. Мы провели аналогию между полоидальной циркуляцией на Солнце и вихрями Тейлора – вихревыми структурами, возникающими в сферическом течении Куэтта (1890) при потере устойчивости дифференциально вращающимся слоем жидкости. При этом мы руководствовались критерием Рэля (1916, 1923) устойчивости вращательного движения. Нами была исследована устойчивость дифференциального вращения Солнца, пространственная структура которого определена гелиосейсмологическими методами (Томпсон и др., 2003). Было установлено наличие области, в которой тороидальное (широтное) течение теряет устойчивость. Следствием развивающейся неустойчивости является возбуждение крутильных колебаний и полоидальной циркуляции, для которой присущи пространственно-временные вариации.

В настоящей работе представлены некоторые результаты численных расчетов пространственных и временных вариаций тороидальной и полоидальной компонент трехмерного глобального течения вещества в СКЗ. Результаты моделирования сравниваются с данными гелиосейсмологических экспериментов о глобальных течениях Солнца. Сделан вывод, что наблюдаемые полоидальная и тороидальная компоненты принадлежат одной асимметричной гидродинамической моде колебаний сложной пространственной структуры.

### 3 Моделирование тороидального и полоидального глобальных течений

Торсионные колебания представляют собой зоны быстрого и медленного вращения, чередующиеся по широте и мигрирующие от высоких широт к низким по мере развития цикла (рис. 1а). Зональные мигрирующие течения, несомненно, играют большую роль в механизме солнечного цикла, потому что активные области появляются, как уже отмечалось, преимущественно на границе между быстрыми и медленными потоками (Косовичев, 2008).

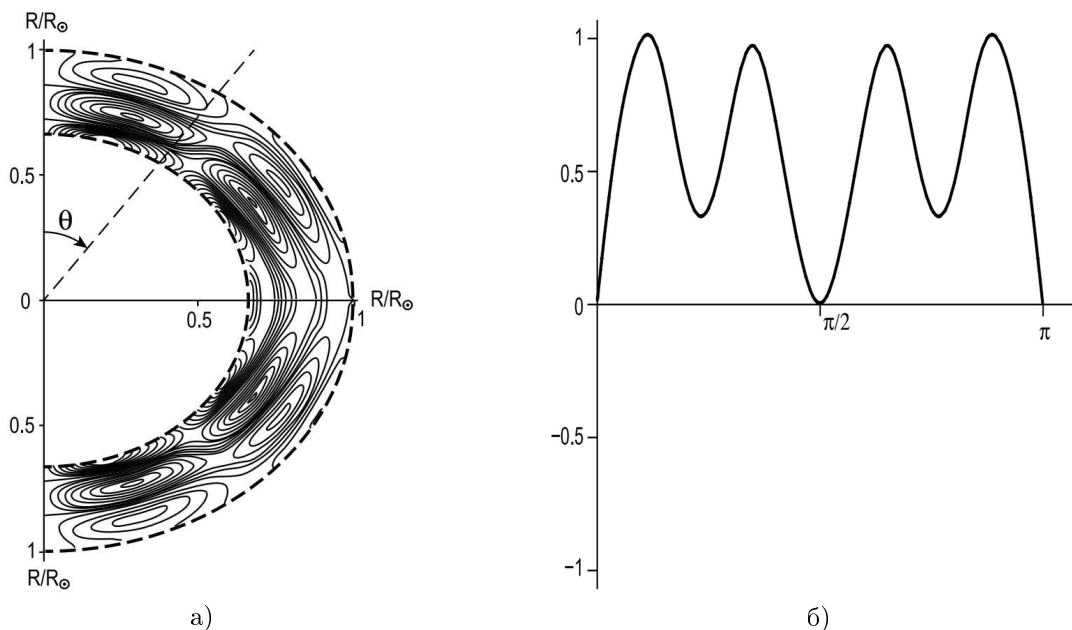


**Рис. 1.** а) Торсионные колебания: вариации частоты вращения  $\delta\Omega/2\pi$  в зависимости от времени (ось абсцисс) и солнечной широты (ось ординат) для относительного радиуса Солнца  $r = R/R_{\odot} = 0.99$  ( $R_{\odot}$  – радиус Солнца) (Хау и др., 2005); б) Пространственно-временные вариации полоидального течения: зависимость величины полоидальной скорости течения от времени (ось абсцисс) и солнечной широты (оси ординат) для  $r = R/R_{\odot} = 0.998$ . Знак полоидальной скорости в южном полушарии авторами этого рисунка (Басу и Антия, 2010) был изменен на противоположный. На рисунках наглядно прослеживается связь (подобие) между обоими течениями

На основе гелиосейсмических данных в течение цикла удалось исследовать временные вариации также и меридионального потока. Было установлено, что в структуре полоидального течения присутствуют полосы быстрых и медленных потоков, похожие на отмеченные выше зональные течения (Бек и др., 2002; Гонсалес и др., 2010). Басу и Антия (2010) методами локальной гелиосейсмологии рассчитали величины скоростей антисимметричного по отношению к экватору полоидального потока. Для наглядного анализа они инвертировали (изменили на противоположный) знак значения скоростей в южном полушарии Солнца (рис. 1б). В результате стала очевидной связь (подобие) между обоими течениями (см. рис. 1а и рис. 1б).

Простая математическая модель полоидального (Логинов и др., 2011б) и тороидального (Логинов и др., 2012) течений в рамках реализации предложенного гидродинамического механизма позволяет рассчитывать пространственный вид и эволюцию во времени возбуждаемых течений на Солнце. Методика численных решений уравнений гидродинамического движения жидкости (метод Галеркина) описана в работе авторов (Логинов и др., 2011а). Ниже кратко приведены полученные нами результаты численного моделирования трехмерного течения вещества в СКЗ на основе гидродинамического механизма возникновения глобальных течений вследствие потери устойчивости дифференциального вращения Солнца (Логинов и др., 2011б, 2012). В результате расчетов было получено численное решение в виде 18 линейно независимых пространственных мод: 9 антисиммет-

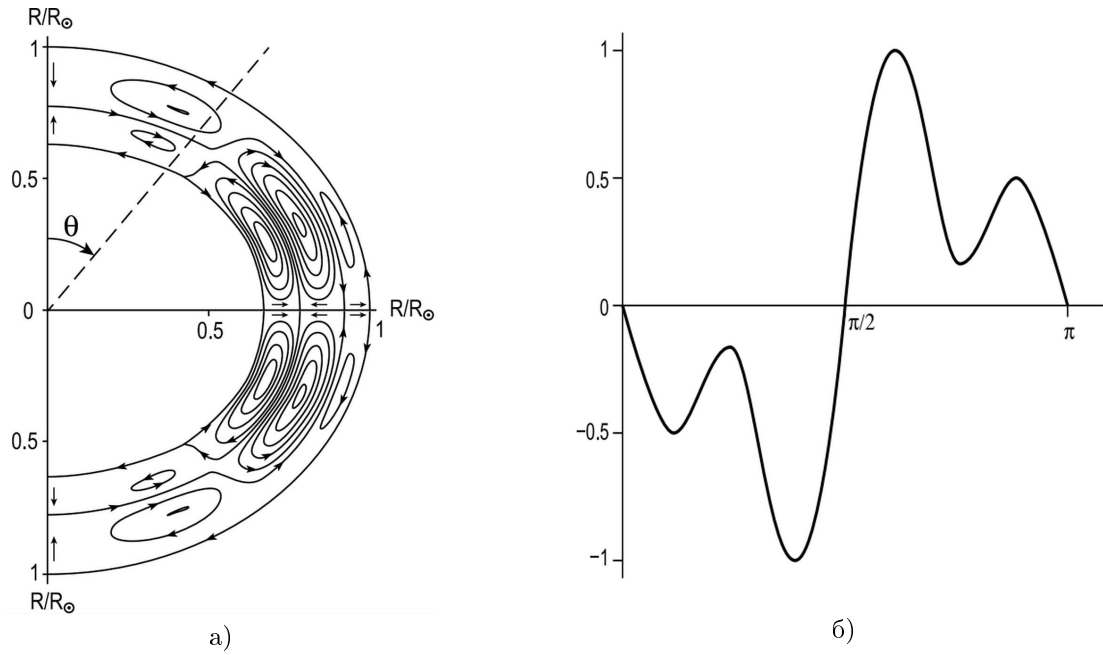
ричных и 9 симметричных относительно плоскости экватора Солнца решений со сложной пространственной структурой и нарастающей по времени амплитудой. Ввиду линейности рассматриваемой модели можно говорить только о частотах колебаний и времени нарастания для каждой моды, и зависимости *только относительной* амплитуды скорости от полярного угла  $\theta$  (в сферической системе координат) и относительного радиуса  $R/R_{\odot}$  ( $R_{\odot}$  – радиус Солнца) в СКЗ. Полоидальная компонента антисимметричных течений обнуляется на экваторе, тогда как симметричная может иметь на экваторе отличную от нуля полоидальную скорость. Были получены колебательные решения: два антисимметричных и одно симметричное с периодами колебаний приблизительно 130 и 35 лет для первых и 20 лет для второго. Период  $\approx 20$  лет характерен для наблюдаемых солнечных процессов. Например, для магнитного цикла Солнца и периодических вариаций торсионных колебаний угловой скорости (дифференциального вращения). Результаты моделирования сравниваются с данными гелиосейсмологических экспериментов о глубинных течениях Солнца.



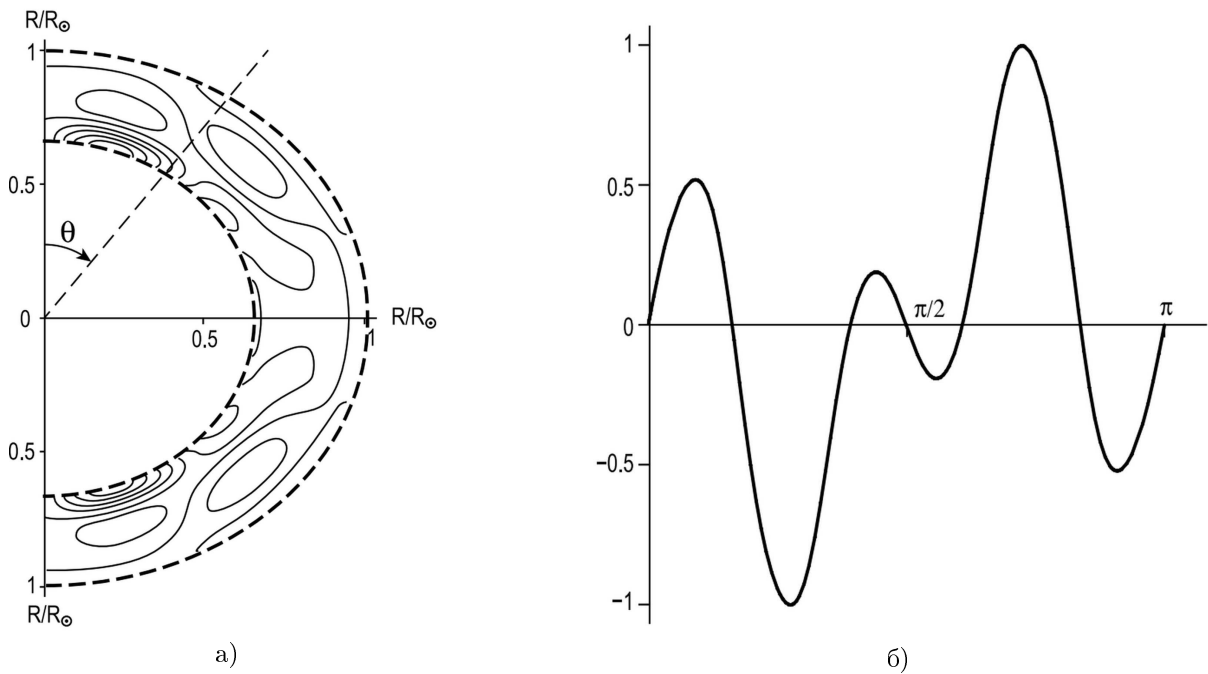
**Рис. 2.** Тороидальная компонента постоянно нарастающей антисимметричной моды: а) линии уровня относительной амплитуды тороидальной скорости  $v_{\varphi}$  в СКЗ; б) зависимость относительной амплитуды скорости  $v_{\varphi}$  на поверхности Солнца от полярного угла  $\theta$

На рис. 2 и 3 для примера приведены тороидальная и полоидальная компоненты глобального поля скоростей для одной *постоянно нарастающей моды*. Из рис. 2 видно, что структура течений тороидальной компоненты симметрична относительно экватора. Скорость  $v_{\varphi}$  на поверхности описывает тонкую структуру поверхностного тороидального вращения – его “полосатость”.

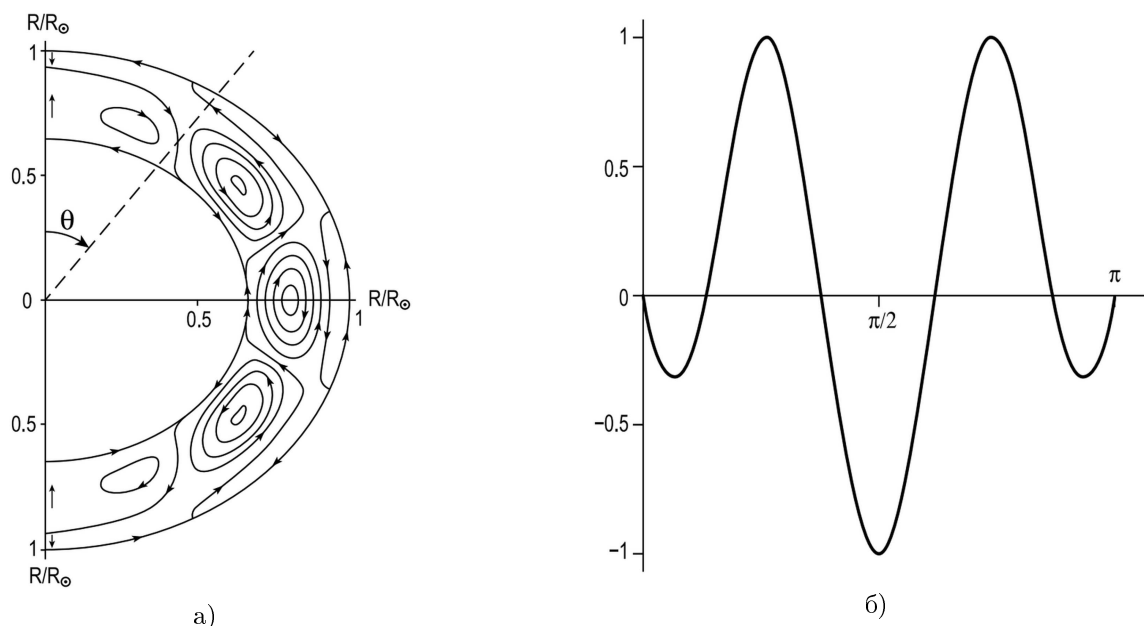
Из рис. 3 видно, что относительная амплитуда скорости поверхностного полоидального течения имеет волнообразную зависимость от полярного угла  $\theta$ : при этом в северном и южном полушариях течения направлены в противоположные стороны.



**Рис. 3.** Полоидальная компонента постоянно нарастающей антисимметричной моды: а) линии тока в СКЗ; б) зависимость относительной амплитуды скорости полоидального течения на поверхности Солнца от полярного угла  $\theta$



**Рис. 4.** Тороидальная компонента симметричной колебательной моды с нарастающей во времени амплитудой: а) линии уровня относительной амплитуды тороидальной скорости  $v_{\varphi}$  в СКЗ; б) зависимость относительной амплитуды скорости  $v_{\varphi}$  на поверхности Солнца от полярного угла  $\theta$

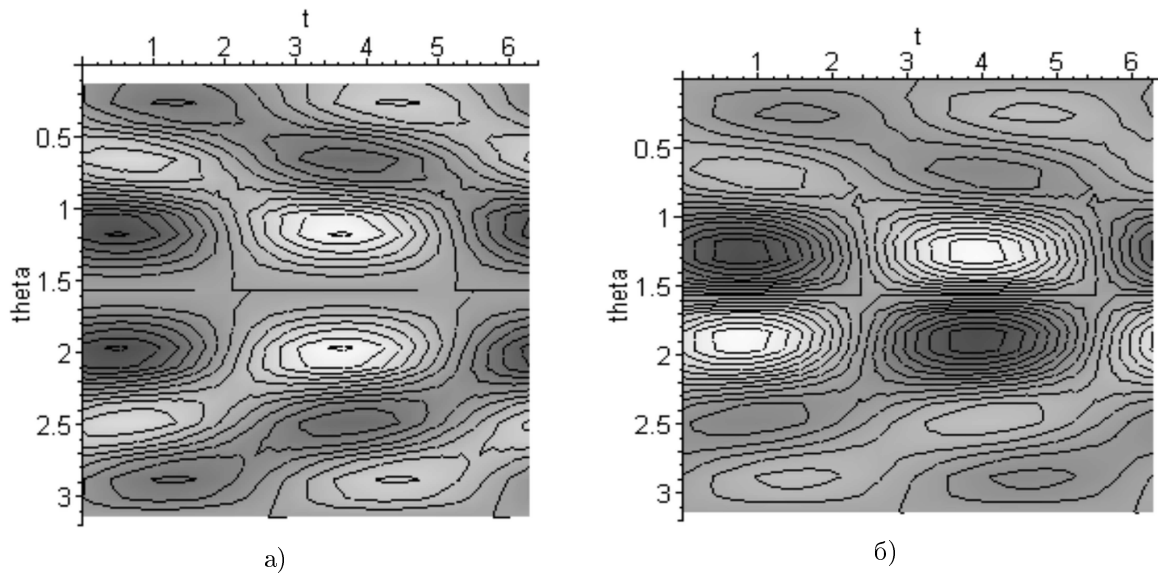


**Рис. 5.** Полоидальная компонента симметричной колебательной моды с нарастающей во времени амплитудой: а) линии тока СКЗ; б) зависимость относительной амплитуды скорости полоидального течения на поверхности Солнца от полярного угла  $\theta$

На рис. 4 и 5 приведены симметричные *колебательные* компоненты глобального поля скоростей с нарастающей во времени амплитудой, период колебаний которой, согласно нашим расчетам, составляет около 20 лет.

Тороидальной компоненте симметричной моды (рис. 4) присущи временные вариации угловой скорости по широте, что проявляется на поверхности Солнца как чередующиеся полосы со слегка замедляющимся и ускоряющимся по отношению к основному движению течением. По видимому, она описывает торсионные колебания с периодом около 22 лет, открытые прямыми спектроскопическими наблюдениями поля скоростей на солнечной поверхности (Ховард и Лабонт, 1980).

Полоидальная компонента симметричной моды (рис. 5) демонстрирует неожиданный эффект поведения, а именно: полоидальные потоки в поверхностных и подповерхностных слоях приэкваториального домена при переходе из северного полушария в южное на экваторе *не спадают до нуля*. На поверхности поток через экватор сохраняет направление к северному полюсу, тогда как на глубине около 50 тыс. км он меняет направление в противоположную сторону – к южному полюсу. Подобный эффект полоидального течения через экватор был обнаружен раньше в результате обработки данных наблюдений (Джилс и др., 1997; Басу и Антия, 2010). Авторами работы (Джилс и др., 1997) было найдено, что поле скоростей меридиональной циркуляции во внешних подфотосферных слоях, рассчитанное методом гелиосейсмической томографии, совпадает с наблюдаемой картиной этого течения на солнечной поверхности. При этом был выявлен эффект меридионального течения через экватор. Позже в работе (Басу и Антия, 2010) путем обработки данных спектроскопических наблюдений всего солнечного диска в 23-м цикле, полученных с помощью прибора *Michelson Doppler Imager*, установленного на борту космической станции *SOHO*, было также установлено наличие в подповерхностных слоях отличного от нуля меридионального потока, пересекающего экватор. Однако авторы цитируемой работы, сославшись на возможные ошибки измерительной аппаратуры при разных позиционных углах наблюдений, подвергли сомнению свой результат. Мы же считаем, что полученное нами путем численного моделирования полоидальное течение через экватор служит аргументом в пользу действительности меридионального потока через экватор.



**Рис. 6.** а) Тороидальная и б) полоидальная компоненты скорости антисимметричной колебательной моды. По оси абсцисс время  $t$  дается в радианах. По оси ординат отложен полярный угол  $\theta$  в радианах; экватору соответствует угол  $\pi/2$ . Цвета на рисунке имеют градацию от белого (положительное максимальное значение скорости) до темно-серого цвета (отрицательное максимальное значение скорости)

На рис. 6 приведена рассчитанная нами картина поведения тороидальной и полоидальной компонент мод стоячих колебаний на солнечной поверхности в течение полного периода.

Интересно провести сравнение рис. 1 (наблюдения) и рис. 6 (численное моделирование). Из сопоставления рис. 1а (наблюденные торсионные колебания) с рис. 6а (рассчитанная тороидальная компонента глобальной скорости) отчетливо видно их качественное совпадение. А именно: 1) оба процесса периодичны и имеют структуру чередующихся полос увеличения и замедления тороидальной компоненты скорости; 2) возникающие на высоких широтах полосы вариации тороидальной скорости в течение периода процесса дрейфуют к экватору. Из сопоставления рис. 1б (наблюденные пространственно-временные вариации полоидальной скорости) с рис. 6б (рассчитанная полоидальная скорость) также видно их качественное совпадение. Заметим, что при построении рис. 6б инверсию скоростей мы не производили.

#### 4 Выводы и заключение

Анализ полученных численных решений уравнений, описывающих вихревые движения в СКЗ, дает качественное совпадение с наблюдаемыми глобальными течениями на солнечной поверхности. Из этого совпадения можно сделать следующие выводы.

1. Торсионные колебания и пространственно-временные вариации глобального полоидального течения Солнца, очевидно, имеют гидродинамическую природу, в основе которой лежит потеря устойчивости дифференциального вращения.
2. Наблюдаемые глобальные течения, очевидно, представляют собой проявление на поверхности изменяющихся по глубине стоячих гидродинамических колебаний солнечной плазмы сложной пространственной структуры, которые простираются до дна СКЗ.
3. Торсионные колебания и вариации глобального полоидального течения по своей сути есть тороидальная и полоидальная компоненты одной и той же асимметричной относительно солнечного

экватора гидродинамической моды колебаний сложной пространственной структуры. Поэтому их необходимо изучать совместно.

Предложенная нами гидродинамическая модель не имеет свободных параметров, которые можно “подкрутить” с целью подгонки решения, например, под наблюдаемые данные. Поэтому по данным гелиосейсмологических экспериментов о глубинном дифференциальном вращении Солнца мы можем путем численного моделирования построить картину глобальных течений. В дальнейшем мы намерены использовать наш подход для исследования динамики глобального магнитного поля в солнечных циклах.

## Литература

- Антиа и Басу (Antia H.M., Basu S.) // *ESA SP-259: SOHO 14: Helio- and asteroseismology: towards a golden future*. 2004. P. 305.
- Басу и Антиа (Basu S., Antia H.M.) // *Astrophys. J.* 2010. V. 717. P. 488.
- Бек и др. (Beck J.G., Gizon L., Duvall T.L., Jr.) // *Astrophys. J.* 2002. V. 575. P. L47.
- Браун и Бирк (Braun D.C., Birc A.C.) // *Astrophys. J. Lett.* 2008. V. 689. P. L161.
- Ванг и др. (Wang Y-M., Robbrecht E., Sheeley N.R.) // *Astrophys. J.* 2009. V. 707. P. 1372.
- Воронцов и др. (Vorontsov S.V., Christensen-Dalsgaard J., Schou J., Starkov V.N., Thompson M.J.) // *Science*. 2002. V. 296. P. 101.
- Гонсалес и др. (González H.I., Howe R., Komm R., Hill F., Schou J., Thompson M.J.) // *Astrophys. J. Lett.* 2010. V. 713. P. L16.
- Джилс и др. (Giles P.M., Duval T.L Jr., Scherrer P.H., Bogart R.S.) // *Nature (London)*. 1997. V. 390. P. 52.
- Джянг и др. (Jiang J., Isik E., Cameron R.H., Schmitt D., Schussler M.) // *Astrophys. J.* 2010. V. 717. P. 597.
- Дикпати (Dikpati M.) // *Astrophys. J.* 2011. V. 733. P. 90.
- Жао и Косовичев (Zhao J., Kosovichev A.G) // *Astrophys. J.* 2004. V. 603. P. 776.
- Комм и др. (Komm R.W., Howard R.F., Harvey J.W.) // *Solar Phys.* 1993. V. 147. P. 207.
- Косовичев А.Г. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 2007. Т. 103. № 2. С. 130.
- Косовичев (Kosovichev A.G) // *Advances in Space Research*. 2008. V. 41. P. 830.
- Косовичев и Скоу (Kosovichev A.G., Schou J.) // *Astrophys. J.* 1997. V. 482. P. L207.
- Криводубский В.Н. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 2011. (в печати).
- Куэтт (Couette M.) // *Ann. Chem. Phys.* 1890. V. 21. P. 433.
- Логинов А.А., Сальников Н.Н., Черемных О.К., Зельк Я.И., Маслова Н.В. // *Кинем. и физ. небесн. тел.* 2011а. Т. 27. № 5. С. 3.
- Логинов А.А., Сальников Н.Н., Черемных О.К., Криводубский В.Н., Маслова Н.В. // *Космічна наука і технологія*. 2011б. Т. 17. № 1. С. 29.
- Логинов А.А., Черемных О.К., Криводубский В.Н., Сальников Н.Н. // *Космічна наука і технологія*. 2012. Т. 18.
- Нанди и др. (Nandy D., Muñoz-Jaramillo A., Martens P.C.H.) // *Nature*. 2011. V. 471. № 7336. P. 80.
- Нем-Риб и др. (Nesme-Ribes E., Meunier N., Vince I.) // *Astron. Astrophys.* 1997. V. 321. P. 323.
- Снодграсс и Дейли (Snodgrass H.B., Dailey S.B.) // *Solar Phys.* 1996. V. 163. P. 21.
- Рэлей (Rayleigh J.W.) // *Sci. Pap.* 1916. V. 6. P. 447.
- Рэлей (Rayleigh J.W.) // *Proc. Roy. Soc. London A.* 1923. V. 223. P. 289.
- Томпсон и др. (Thompson M.J., Christensen-Dalsgaard J., Miesch M.S., Toomre J.) // *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* 2003. V. 41. P. 599.
- Хабер и др. (Haber D.A., Hindman B.W., Toomre J., Thompson M.J.) // *Solar Phys.* 2004. V. 220. P. 371.
- Хау и др. (Howe R., Christensen-Dalsgaard J., Hill F., Komm R.W., Larsen R.M., Schou J., Thompson M.J., Toomre J.) // *Astrophys. J.* 2000. V. 533. P. L133.



- Хау и др. (Howe R., Christensen-Dalsgaard J., Hill F., Komm R.W., Schou J., Thompson M.J.) // *Astrophys. J.* 2005. V. 634. P. 1405.
- Ховард и Лабонт (Howard R., LaBonte B.J.) // *Astrophys. J.* 1980. V. 239. P. L33.
- Хэтэуэй (Hathaway D.H.) // *Astrophys. J.* 1996. V. 460. P. 1027.
- Хэтэуэй и др. (Hathaway D.H., Gilman P., Harvey J.W., Hill F., Howard R.F., Jones H.P., Kasher J.C., Leibacher J.W., Pintar J.A., Simon G.W.) // *Science.* 1996. V. 272. P. 1306.
- Хэтэуэй и Райтмайе (Hathaway D.H., Rightmire L.) // *Science.* 2010. V. 327. Issue 5991. P. 1350.
- Шарбоно (Charbonneau P.) // *Living Rev. Solar Phys.* 2010. V. 7. № 3. P. 1. [Online Article]: <http://www.livingreviews.org/lrsp-2010-3>.