

- 2003, in Kharkov // *Geomagnetism and Aeronomy*.—2005.—45, N 4.—P. 494—518.
9. Burmaka V. P., Taran V. I., Chernogor L. F. Ionospheric wave disturbances accompanied by rocket launches against a background of natural transient processes // *Geomagnetism and Aeronomy*.—2004.—44, N 4.—P. 476—491.
  10. Burmaka V. P., Taran V. I., Chernogor L. F. Wave-like processes in the ionosphere under quiet and disturbed conditions. 1. Kharkov incoherent scatter radar observations // *Geomagnetism and Aeronomy*.—2006.—46, N 2.—P. 183—198.
  11. Burmaka V. P., Taran V. I., Chernogor L. F. Wave-like processes in the ionosphere under quiet and disturbed conditions. 2. Analysis of observations and simulation // *Geomagnetism and Aeronomy*.—2006.—46, N 2.—P. 199—208.
  12. Burmaka V. P., Lysenko V. N., Chernogor L. F., Chernyak Yu. V. Wave-like processes in the ionospheric f region that accompanied rocket launches from the Baikonur site // *Geomagnetism and Aeronomy*.—2006.—46, N 6.—P. 742—759.
  13. Chernogor L. F., Garmash K. P., Kostrov L. S., et al. Perturbations in the ionosphere following U. S. powerful space vehicle launching // *Radio Physics and Radio Astronomy*.—1998.—3, N 2.—P. 181—190.
  14. Chernogor L. F., Garmash K. P., Rozumenko V. T. Flux parameters of energetic particles affecting the middle latitude lower ionosphere // *Radio Physics and Radio Astronomy*.—1998.—3, N 2.—P. 191—197.
  15. Chernogor L. F., Rozumenko V. T. Wave processes, global- and large-scale disturbances in the near-earth plasma // *Kinematics and Physics of Celestial Bodies. Suppl.*—2000.—N 3.—P. 514—516.
  16. Chernogor L. F., Kostrov L. S., Rozumenko V. T. Radio probing of the perturbations originating in the near-earth plasma from natural and anthropogenic energy sources // *Kinematics and Physics of Celestial Bodies. Suppl.*—2000.—N 3.—P. 497—500.
  17. Chernogor L. F., Grigorenko Ye. I., Lysenko V. N., Taran V. I. Dynamic processes in the ionosphere during magnetic storms from the Kharkov incoherent scatter radar observations // *Int. J. Geomagn. Aeron.*—2007.—7, GI3001.—doi:10.1029/2005GI000125.
  18. Garmash, K. P., Kostrov L. S., Rozumenko V. T., et al. Global ionospheric disturbances caused by a rocket launch against a background of a magnetic storm // *Geomagnetism and Aeronomy*.—1999.—39, N 1.—P. 69—75.
  19. Grigorenko E. I., Lazorenko S. V., Taran V. I., Chernogor L. F. Wave disturbances in the ionosphere accompanying the solar flare and the strongest magnetic storm of September 25, 1998 // *Geomagnetism and Aeronomy*.—2003.—43, N 6.—P. 718—735.
  20. Grigorenko E. I., Lysenko V. N., Taran V. I., Chernogor L. F. Specific features of the ionospheric storm of March 20—23, 2003 // *Geomagnetism and Aeronomy*.—2005.—45, N 6.—P. 745—757.
  21. Grigorenko E. I., Lysenko V. N., Taran V. I., et al. Dynamic processes in the ionosphere during the strongest magnetic storm of May 30—31, 2003 // *Geomagnetism and Aeronomy*.—2005.—45, N 6.—P. 758—777.
  22. Panasenko S. V., Chernogor L. F. Event of the November 7—10, 2004 magnetic storm in the lower ionosphere // *Geomagnetism and Aeronomy*.—2007.—47, N 5.—P. 608—620.

#### PHYSICS AND ECOLOGY OF THE EARTH-ATMOSPHERE-IONOSPHERE-MAGNETOSPHERE SYSTEM

L. F. Chernogor

The Earth-atmosphere-ionosphere-magnetosphere system is proved to be a complex open dynamical nonlinear system. The basic ideas of the system paradigm are stated. The high-energy phenomena in the system are shown to be a cause of a myriad of, as a rule, nonlinear processes and of the rearrangement in the character of subsystem coupling. Ecological consequences of accidents, catastrophes, and regional wars in the Earth-atmosphere-ionosphere-magnetosphere system are discussed.

А. А. Логинов, В. А. Ткаченко, О. К. Черемных

Институт космических исследований НАНУ и НКЛУ, Киев.

## О гидродинамическом механизме смены фаз динамо-цикла Солнца

Представлено 25.06.07

Запропоновано модель механізму зміни фаз генерації магнітного поля Сонця. Суть механізму згідно запропонованої моделі полягає в наступному. Через втрату стійкості тороїдального диференціального обертання Сонця при досягненні порогового значення залежності кутової швидкості від радіуса та широти  $\Omega(r, \theta)$  виникає колоїдальна течія та пов'язаний з нею динамо-процес, який породжує змінне магнітне поле Сонця. Дія на полоїдальну течію сили Коріоліса гальмує диференційне обертання, наслідком чого буде зміна профілю  $\Omega(r, \theta)$  та порушення умови нестійкості. Це призводить в свою чергу до зникнення колоїдальної течії і припинення динамо-процеса. Потім диференціальне обертання відновлюється, динамо-процес поновлюється та при досягненні порогового значення кутової швидкості знову виникає зародження змінного магнітного поля Сонця.

В последнее время достигнут определенный прогресс в понимании механизма генерации магнитного поля Солнца, который принято называть «динамо»-процессом [12]. Проблема происхождения и поддержания магнитного поля Солнца актуальна для объяснения изменения его полярности и физических процессов, сопровождающих цикл солнечной активности, а также при изучении ряда астрофизических явлений. Впервые она была сформулирована в знаменитой работе Лармора [21].

Значительную роль в развитии теории магнитного динамо и ее приложений сыграла теорема «вмороженности» магнитных силовых линий в движущуюся идеально проводящую среду, сформулированная Альвеном [13]. Эффект вмороженности силовых линий в плазменную среду приводит к тому, что при движении последней магнитное поле может нарастать. Простейшим примером такого процесса является усиление магнитного поля при сжатии проводящего вещества.

Обычно говорят, что первые результаты теории динамо были отрицательными. Так, широкую известность получила теорема Каулинга [7, 14] о невозможности поддержания магнитного поля осесимметричным движением проводящей жидкости и последующие ее обобщения на случай двумерного движения [6], а также других движений с простой симметрией. Сегодня, однако, уже можно говорить о позитивном значении работ этого периода. Именно после их опубликования стало ясно, что движения, способные поддерживать и генерировать магнитные поля, должны быть несимметричными и трехмерными. Кроме того, в этих работах были открыты некоторые эффекты, которые сейчас являются составной частью любой современной теории динамо-процесса, например диамагнитный эффект выталкивания силовых линий магнитного поля из турбулентной проводящей среды [6].

Таким образом, можно сказать, что теория динамо — это теория возбуждения магнитных полей трехмерными несимметричными движениями проводящей среды. Для реализации динамо должна быть нарушена отражательная симметрия движений, простейшей мерой которой служит спиральность [12] (произведение завихренности на скорость). Именно после того, как Паркером [22], Брагинским [1—4] и особенно Штейнбеком, Краузе и Редлером [27] было установлено, что проводящая среда, мелкомасштабные движения которой имеют спиралевидный характер, способна генерировать крупномасштабные магнитные поля, и начался современный этап развития теории динамо.

Приводным механизмом динамо-процесса на Солнце, по нашему мнению, является дифференциальное вращение плазмы, обусловленное неоднородным вращением Солнца, т. е. зависимостью уг-

ловой скорости от широты и от радиуса [8]. Помимо общефизического интереса к его происхождению, изучение неоднородного вращения является актуальным также и с той точки зрения, что оно, по-видимому, играет ключевую роль в формировании магнитной активности Солнца: одиннадцатилетний солнечный цикл, вспышки и пятна на солнечной поверхности и т. д. [25].

В последние годы повышенное внимание к дифференциальному вращению было обусловлено рядом экспериментальных и теоретических достижений. Во-первых, метод доплер-зеemanовских изображений позволил анализировать движение пятен по поверхности Солнца и определять вращения глубинных слоев Солнца. Во-вторых, развитие гелиосейсмологии [5] позволило по наблюдаемым частотам глобальных колебаний определить распределение угловой скорости не только на поверхности Солнца, но и в его глубине [24, 28]. В-третьих, развитие теории достигло определенной степени завершенности, о чем свидетельствует появление количественных характеристик дифференциального вращения. Можно сказать, что на сегодняшний день теория адекватно описывает внутреннее вращение Солнца и находится в хорошем согласии с данными гелиосейсмологии, а ее предсказания подтверждаются наблюдениями [8].

В настоящее время принято считать, что дифференциальное вращение на Солнце возникает из-за взаимодействия конвективного движения плазменной среды с ее глобальным вращением. Конвективная турбулентность во вращающейся среде испытывает влияние кориолисовых сил, которое модифицирует вращение, делая его неоднородным. Впервые эта идея была высказана в работе А. И. Лебединского [10], в которой было показано, что режим дифференциального вращения на Солнце устанавливается вследствие турбулентного переноса углового момента из внутренних областей наружу. Наличие ненулевых турбулентных потоков углового момента во вращающихся средах называют  $\Lambda$ -эффектом [23].

Известно, что в неоднородной вращающейся среде при определенных условиях возникает полоидальное течение [11, 16—18]. На Солнце полоидальное течение направлено от экватора к полюсам вблизи поверхности Солнца и от полюсов к экватору — в глубине конвективной зоны [8]. Полоидальная циркуляция на Солнце подтверждается наблюдениями. В частности, доплеровские измерения свидетельствуют о том, что течение плазмы от экватора к полюсам на солнечной поверхности происходит со средней скоростью порядка 10 м/с [19]. В последнее время данные гелиосейсмологии указывают на наличие глубинного полоидального течения [29].

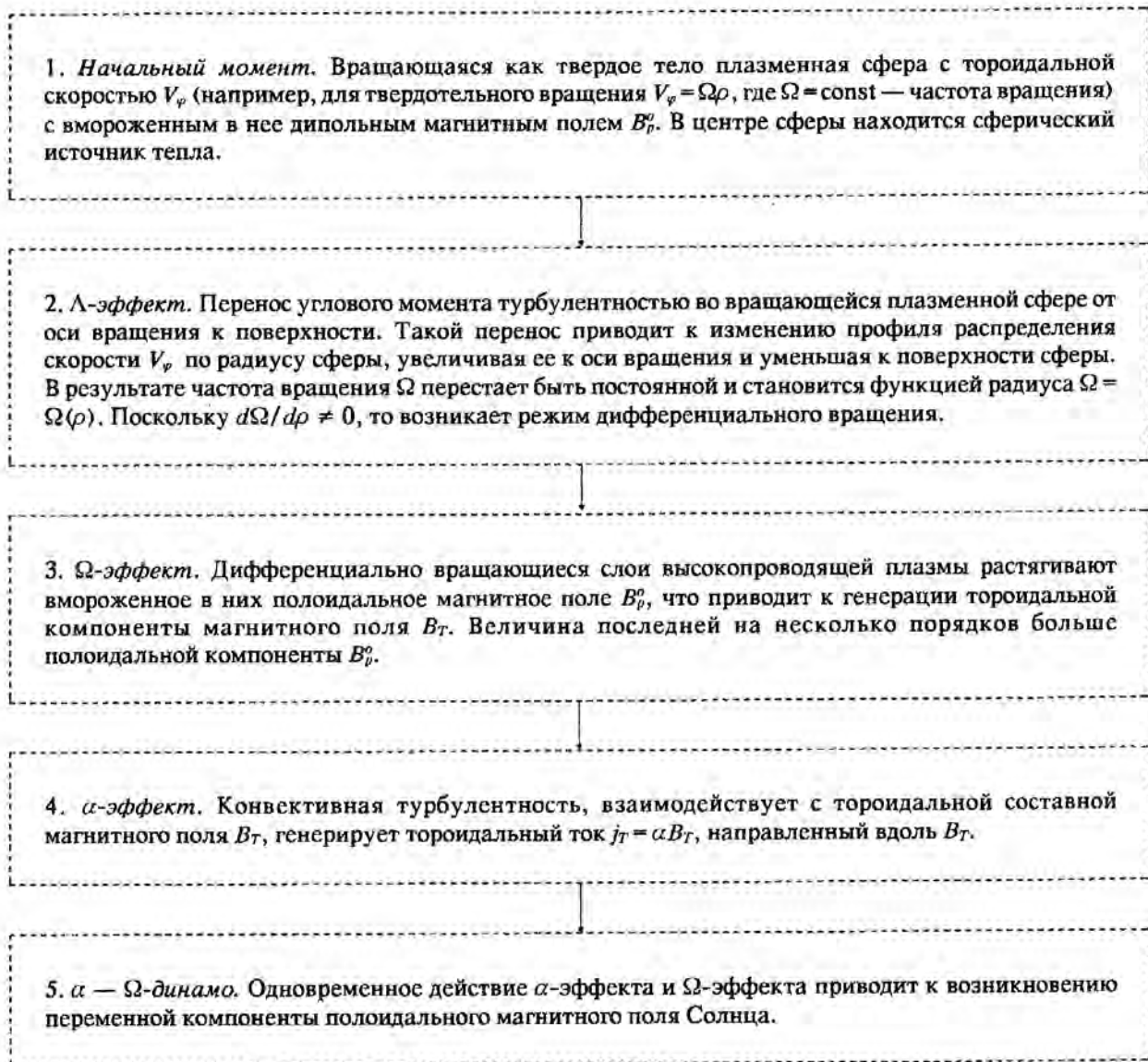


Рис. 1. Последовательность физических процессов при генерации магнитного поля Солнца

Дифференциальное вращение взаимодействует с постоянно присутствующим на Солнце полоидальным магнитным полем  $B_p^0$ , (медленно затухающим реликтовым магнитным полем, захваченным при аккреции Солнца). Вследствие вмороженности  $B_p^0$  в высокопроводящую плазму последнее увлекается тороидальным сдвиговым течением и усиливается, генерируя тороидальное магнитное поле  $B_T$  (так называемый  $\Omega$ -эффект [22]). Известно, что спиральное турбулентное течение высокопроводящей

плазмы при наличии тороидального магнитного поля генерирует тороидальный ток  $j_T = \alpha B_T$  [12] (так называемый  $\alpha$ -эффект, где  $\alpha$  — параметр турбулентных пульсаций [26]), который, в свою очередь, является источником переменного полоидального магнитного поля Солнца. Одновременное действие  $\alpha$ -эффекта и  $\Omega$ -эффекта называется  $\alpha - \Omega$ -динамо. Схема, поясняющая суть динамо-процесса, приведена на рис. 1.

В весьма запутанной картине наблюдаемых на

Солнце процессов различных пространственно-временных масштабов и их сложном влиянии друг на друга нелегко выделить причины и следствия различных явлений во времени. Тем более что процесс, являющийся в данный момент причиной возникновения другого процесса, в последующем может являться причиной изменения динамики первого процесса вплоть до его полного исчезновения. В тоже время одно явление-причина может порождать несколько явлений-следствий. Так, в приведенной выше схеме мелкомасштабная конвективная турбулентность во вращающейся плазме лежит в основе двух глобальных эффектов:  $\Lambda$ -эффекта и  $\alpha$ -эффекта. Поэтому становится понятной трудность описания динамики простого процесса, и тем более такого сложного, как динамо-процесс. Обычно в теории солнечных процессов при их описании от возникновения до полного развития или исчезновения говорят об исчерпании причин, породивших эти процессы. Установление связи между наблюдаемыми процессами затрудняет также пороговый характер их проявления, когда достаточно заметное изменение наблюдаемых параметров вдали от их пороговых значений не приводит к качественным изменениям наблюдаемого явления, а вблизи пороговых значений незаметное для наблюдения изменение параметров качественно изменяет наблюдаемый процесс.

К пороговым явлениям относится, в частности, и генерация полоидального течения вследствие потери устойчивости дифференциально вращающейся плазменной сферы. По нашему мнению, приведенную выше общепринятую схему динамо-процесса следует уточнить и расширить, включив в нее явление полоидального течения, наблюдаемое на Солнце. Проанализируем качественно, к чему это может привести. В литературе известен критерий устойчивости неоднородного вращения жидкости — это критерий Тейлора для течения Куэтта [9]. В нашем случае вращение плазменной сферы будет устойчиво, если в любой ее точке выполняется неравенство

$$\mu(\rho) \frac{d\mu(\rho)}{d\rho} > 0,$$

где  $\mu = m\rho V_\varphi$  — угловой момент единичной массы  $m$ , возрастающий с радиусом  $\rho$ . Такой режим вращения можно называть докритическим. Режим течения  $d\mu(\rho)/d\rho = 0$  будем называть пороговым или критическим, поскольку условие  $d\mu(\rho)/d\rho = 0$  определяет границу устойчивости. Течение, для которого неравенство нарушено, назовем надкритическим.

Численное моделирование, проведенное ранее в [11] для жидкости, заключенной между вращающимися сферами, показало, что в надкритическом

режиме вращения сферического слоя жидкости происходит потеря устойчивости в виде возникновения и быстрого нарастания полоидальной компоненты течения. Эта компонента отсутствует в докритическом и критическом режимах вращения. В гидродинамике этот эффект хорошо известен и, например, имеет место в уже упоминавшемся выше течении Куэтта. Таким образом переход в надкритическом режим вращения в солнечной конвективной зоне приводит к генерации полоидального течения, которое имеет форму «чечевицы»: на дне конвективной зоны оно направлено от полюсов к экватору, а на поверхности — от экватора к полюсам [8] (см. рис. 2). Отметим, что на рис. 2 показано, что направление скорости полоидального течения в плоскости экватора и на оси вращения имеет чисто радиальное направление. Вектор скорости  $V_\rho$  полностью лежит в меридиональной плоскости, и при обходе вдоль замкнутой линии тока совершает поворот на  $360^\circ$ .

На возникшее полоидальное течение действует сила Кориолиса  $F_k \sim V_\rho \times \Omega$  ( $V_\rho$  — полоидальная скорость течения,  $\Omega$  — частота вращения). Поскольку  $\Omega$  и  $V_\rho$  лежат в меридиональной плоскости, то сила Кориолиса ей перпендикулярна, и имеет только  $\varphi$ -ю составляющую в сферической системе координат, связанных с Солнцем. Так как вектор скорости полоидального течения изменяет направление при движении вдоль любой линии тока полоидального течения, то сила Кориолиса действует в противоположных направлениях для приповерхностных и глубинных слоев плазмы. Поэтому весь объем плазмы условно делится на две области по отношению к направлению действия силы Кориолиса: объем, где  $F_k$  направлена на восток, и объем, где  $F_k$  направлена на запад. На рис. 3 эти области обозначены цифрами 1 и 2, соответственно.

На рис. 3 в плоскости экваториального сечения качественно представлено поведение тороидальной скорости и действие кориолисовых сил вне области твердотельного вращения. Заметим, что в экваториальной плоскости, где полоидальное течение строго радиально и направлено изнутри наружу, сила Кориолиса действует только в западном направлении. На полюсах сила Кориолиса отсутствует. Необходимо отметить, что в области 1 скорость  $V_\rho$  меньше, чем в области 2, что является следствием  $\Lambda$ -эффекта. При этом во всей области полоидального движения имеет место конкуренция  $\Lambda$ -эффекта и силы Кориолиса. В области 1 такая конкуренция приведет к увеличению тороидальной скорости, а в области 2 — к ее уменьшению. Можно сказать, что сила Кориолиса стремится устранить влияние  $\Lambda$ -эффекта, уменьшая угловой момент в глубинных слоях Солнца и увеличивая

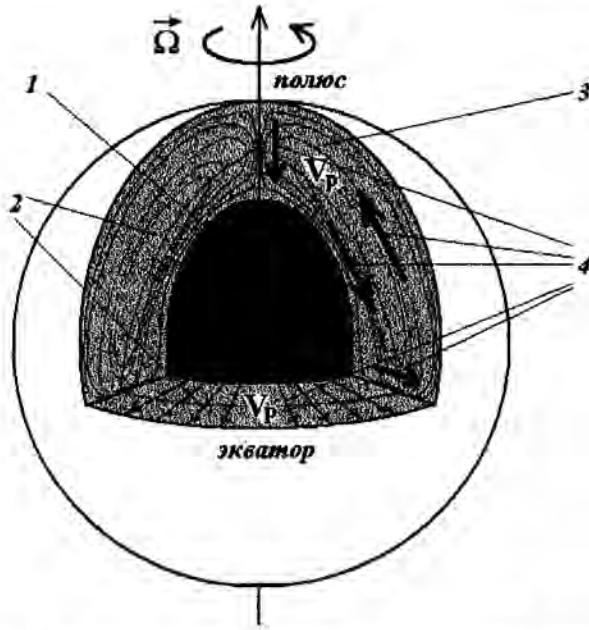


Рис. 2. Полоидальное течение на Солнце: 1 — область твердотельного вращения, 2 — область полоидального течения, 3 — линии тока полоидального течения, 4 — направление скорости  $V_p$  полоидального течения

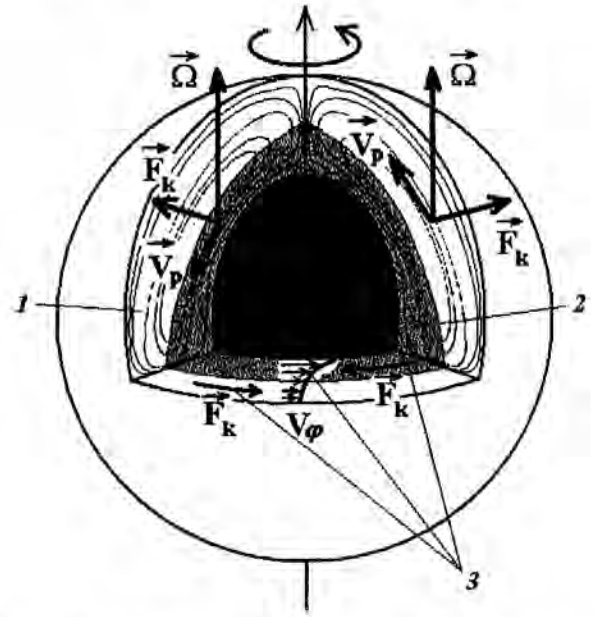


Рис. 3. Схема действия силы Кориолиса  $F_k$  на профиль распределения торoidalной скорости  $V_\phi$  по радиусу: 1 — часть области полоидального течения, где  $F_k$  направлена на восток, 2 — часть области полоидального течения, где  $F_k$  направлена на запад, 3 — профиль распределения торoidalной скорости  $V_\phi$  по радиусу и воздействующая на него сила Кориолиса  $F_k$

угловой момент вблизи его поверхности. При определенных условиях сила Кориолиса переводит вращение плазмы из надкритического состояния в докритическое. Когда профиль зависимости частоты вращения от радиуса  $r$  и широты  $\theta$  достигнет некоторого порогового значения [11], дифференциальное течение станет устойчивым и, как следствие, полоидальное течение исчезнет, а сила Кориолиса обратится в ноль. Переход вращения плазмы из надкритического состояния в докритическое приводит к срыву генерации торoidalного магнитного поля и его исчезновению, т. е. к прекращению действия  $\Omega$ -эффекта. Это в свою очередь приведет к исчезновению эффекта  $\alpha - \Omega$ -динамо, а вместе с ним — и генерации переменной составляющей полоидального магнитного поля. Затем динамоцикл возобновляется вследствие  $\Lambda$ -эффекта.

Подводя итоги проведенного качественного анализа, отметим, что в основе смены фаз динамо-процесса, по нашему мнению, лежит пороговый механизм потери устойчивости дифференциального вращения солнечной плазмы и генерации полоидальной компоненты глобального течения Солнца.

Остановимся еще на одном чисто гидродинамическом эффекте, вытекающем из проведенного анализа. Как отмечалось выше, действие  $\Lambda$ -эффекта

на некотором первоначальном промежутке времени приводит к переносу углового момента из глубин Солнца к его поверхности, что выражается в постепенном уменьшении торoidalной скорости  $V_\phi$  на поверхности. Затем, по прошествии некоторого времени, имеет место переход дифференциального вращения из докритического состояния в надкритическое, что приводит к потере устойчивости торoidalного течения и возникновению полоидального течения на Солнце. Полоидальное течение характеризуется нарастанием величины скорости и одновременно увеличением кориолисовой силы. Действие силы Кориолиса в области 1 приводит к постепенному увеличению торoidalной скорости  $V_\phi$  на поверхности вплоть до момента перехода торoidalного течения в устойчивое докритическое состояние. Этот переход сопровождается исчезновением полоидального течения и силы Кориолиса. По этой причине останавливается рост торoidalной скорости  $V_\phi$  на поверхности и начинается ее уменьшение вследствие действия  $\Lambda$ -эффекта. Описанный процесс является протяженным во времени и, видимо, периодическим. Заметим, что эффект

периодического нарастания и уменьшения скорости вращения поверхности Солнца подтвержден наблюдениями и получил название крутильных колебаний Солнца [15, 20]. Поскольку характерный период этих колебаний совпадает с периодом смены полярности магнитного поля Солнца, то можно предположить, что влияние сил Кориолиса на динамо-процесс необходимо учитывать в теории генерации магнитного поля Солнца.

1. Брагинский С. И. Кинематические модели земного магнитного динамо // *Геоматн. Аэрон.*—1964.—4.—С. 572—583.
2. Брагинский С. И. Магнитогидродинамика земного ядра // *Геоматн. Аэрон.*—1964.—4.—С. 698—711.
3. Брагинский С. И. Самовозбуждение магнитного поля при движении высокопроводящей жидкости // *ЖЭТФ.*—1964.—48.—С. 1084.
4. Брагинский С. И. Теория гидромагнитного динамо // *ЖЭТФ.*—1964.—48.—С. 2178.
5. Воронцов С. В., Жарков В. И. // *Итоги науки и техники. Астрономия.*—1988.—Т. 38.—253 с.
6. Зельдович Я. Б. Магнитное поле при двумерном движении проводящей турбулентной жидкости // *ЖЭТФ.*—1956.—31.—С. 154—146.
7. Каулинг Т. Магнитная гидродинамика. — М.: Изд-во ин-стр. лит-ры, 1959.
8. Кичатинов Л. Л. Дифференциальное вращение звезд // *Успехи физ. наук.*—2005.—175, № 5.—С. 475—494.
9. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. *Гидродинамика.* — М.: Наука, 1986.—733 с.
10. Лебединский А. И. Вращение Солнца // *Астрон. журн.*—1941.—18, № 1.—С. 10—25.
11. Логинов А. А., Самойленко Ю. И., Ткаченко В. А. Возмущение меридионального течения дифференциальным вращением в жидком ядре Земли // *Космічна наука і технологія.*—2000.—6, № 2/3.—С. 53—68.
12. Моффат Г. Возбуждение магнитного поля в проводящей среде. — М.: Мир, 1980.—340 с.
13. Alfvén H. On the existence of electromagnetic-hydrodynamic waves // *Arkiv. F. Mat. Astron. Fysic.*—1942.—29B, N 2.—7 p.
14. Cowling T. G. The magnetic field of sunspots // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1934.—94.—P. 39—48.
15. Howard R. E., LaBonte B. J. The sun is observed to be a torsional oscillator with a period of 11 years // *Astrophys. J. Lett.*—1980.—239.—P. L33—L36.
16. Kippenhahn R. Differential rotation in stars with convective envelopes // *Astrophys. J.*—1963.—137.—P. 664—678.
17. Kitchatinov L. L., Rudiger G. Differential rotation in solar-type stars: revisiting the Taylor-number puzzle // *Astron. and Astrophys.*—1995.—299.—P. 446.
18. Kitchatinov L. L., Rudiger G. Differential rotation models for late-type dwarfs and giants // *Astron. and Astrophys.*—1999.—344.—P. 911—917.
19. Komm R. W., Howard R. E., Harvey J. W. Meridional flow of small photospheric magnetic features // *Solar. Phys.*—1993.—147, N 2.—P. 207—223.
20. LaBonte B. J., Howard R. Torsional waves on the Sun and the activity cycle // *Solar Phys.*—1982.—75.—P. 161—178.
21. Larmor I. How could a rotation body such as the Sun become a magnet // *Rep. Brit. Assoc. Adv. Sci.*—1919.—P. 159—160.
22. Parker E. N. Hydromagnetic dynamo models // *Astrophys. J.*—1955.—122.—P. 293—314.
23. Rudiger G. Reynolds stresses and differential rotation. I. On recent calculations of zonal fluxes in slowly rotating stars // *Geophys. and Astrophys. Fluid Dynamics.*—1980.—16, N 1.—P. 239—261.
24. Sehou J., et al. Helioseismic studies of differential rotation in the solar envelope by the solar oscillations investigation using the Michelson Doppler imager // *Astrophys. J.*—1998.—505, N 1.—P. 390—417.
25. Sokoloff D. D. The Maunder minimum and the solar dynamo // *Solar Phys.*—2004.—224.—P. 145—152.
26. Steenbeck M., Krause F. The generation of stellar and planetary magnetic fields by turbulent dynamo action // *Z. Naturforsch.*—1966.—21a.—P. 1285—1296.
27. Steenbeck M., Krause F., Radler K. A calculation of the mean electromotive force in an electrically conducting fluid in turbulent motion under the influence of Coriolis forces // *Z. Naturforsch.*—1966.—21a.—P. 369—376.
28. Wilson P. R., Burtonclay D., Li Y. The rotational structure of the region below the solar convection zone // *Astrophys. J.*—1997.—489.—P. 395—402.
29. Zhao J., Kosovichev A. G. Torsional oscillation, meridional flows, and vorticity inferred in the upper convection zone of the Sun by time-distance helioseismology // *Astrophys. J.*—2004.—603, N 2.—P. 776—784.

#### ON HYDRODYNAMIC MECHANISM OF PHASE CHANGE OF THE SUN'S DYNAMO-CYCLE

A. A. Loginov, V. A. Tkachenko, O. K. Cheremnykh

The model of phase change for the Sun's magnetic field generation is proposed. The mechanism of the change is as follows. Due to stability loss of toroidal differential rotation of the Sun at the threshold value of the relationship between the angular velocity and radius and latitude  $\Omega(r, \theta)$  poloidal flows arise and the dynamo-process associated with them and generating the Sun's variable magnetic field occurs. Influence of the Coriolis force on the poloidal flows brakes the differential rotation, which causes a change in structure of  $\Omega(r, \theta)$  and violation of the instability condition. This results in the disappearance of the poloidal flows and in the interruption of the dynamo-process. Then the differential rotation and dynamo-cycle are regained and when the angular velocity reaches the threshold value the Sun's variable magnetic field is generated again.