

Проблемы магнитного динамо

Д.Д. Соколов

Каждые 11 лет в глубине конвективной зоны Солнца от средних широт к экватору пробегает волна квазистационарного магнитного поля, в результате чего образуется 11-летний цикл активности Солнца. Физической причиной этого явления служит механизм динамо, основанный на совместном действии дифференциального вращения и зеркально-асимметричной конвекции. Сходные явления встречаются и в других небесных телах, в какой-то степени их удаётся моделировать в лаборатории. Рассматриваются современное состояние этой области науки и тенденции в развитии изучения явления динамо.

Ключевые слова: магнитные поля, динамо, солнечная активность

PACS numbers: 07.55.Db, 41.20.-q, 91.25.-r, 96.12.Hg, 96.60.Hv

DOI: 10.3367/UFNr.0185.201506h.0643

Содержание

1. Введение: динамо на Солнце и не только (643).
 2. Сценарий солнечного динамо в контексте современных наблюдений (644).
 3. Данные из архивов и звёздные аналогии (645).
 4. Прямое численное моделирование динамо (646).
 5. Динамо-волны с точки зрения теоретической физики (646).
- Список литературы (647).

1. Введение: динамо на Солнце и не только

Наиболее известным проявлением физического процесса, известного как магнитное динамо (гидродинамо), является цикл солнечной активности. В ходе этого цикла, т.е. один раз в 11 лет, по поверхности Солнца в обоих полушариях от средних широт к солнечному экватору пробегает по волне активности, фиксируемой в различных трассерах, из которых наиболее известным (помимо других характеристик) является число солнечных пятен. Эта волна активности вызывается волной квазистационарного магнитного поля, распространяющегося где-то под поверхностью Солнца, в его конвективной зоне. Конечно, с перемещающейся магнитной структурой связано и небольшое электрическое поле, но уже параметры волны — необычайно большой период, пространственные масштабы, сопоставимые с размерами Солнца,

плотность магнитной энергии, сопоставимая с плотностью кинетической энергии конвективных движений солнечной плазмы, — говорят о том, что мы имеем дело с чем-то отличным от обычных электромагнитных волн. С другой стороны, трудно представить, чтобы возникновение рассматриваемой волны было связано с релятивистскими или квантово-механическими процессами, а в области классической физики только явление электромагнитной индукции может претендовать на роль процесса, возбуждающего магнитное поле. В таком общем виде понимание солнечного цикла возникло практически сразу после того, как в начале XX в. выяснилось, что цикл имеет магнитную природу, и для данного процесса, по аналогии с уже забытой ныне деталью автомобильного мотора, было выбрано название "динамо".

Магнитная активность, в определённом смысле похожая на солнечную, наблюдается во многих небесных телах, хотя в силу условий наблюдения или специфики геометрии задачи она принимает существенно иные формы. В частности, с процессом динамо связаны возникновение и эволюция на геологических масштабах времени магнитного поля Земли, а также возникновение крупномасштабных магнитных полей спиральных галактик, включая Млечный Путь.

Постепенно выяснилось, что динамо сильно отличается от привычных процессов теории электричества, однако это отличие связано с непривычным параметром — так называемым магнитным числом Рейнольдса Rm . В самом деле, в явлении динамо индуктивные эффекты должны превосходить диссипацию, а порядковая оценка отношения соответствующих членов в законе Ома в движущейся среде приводит к условию

$$Rm = \frac{v l}{\nu_m} \gg 1, \quad (1)$$

Д.Д. Соколов. Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, физический факультет, Ленинские горы 1, стр. 2, 119991 Москва, Российская Федерация; Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, Калужское шоссе 4, 142190 Троицк, Москва, Российская Федерация
E-mail: sokoloff.dd@gmail.com

Статья поступила 20 марта 2015 г.

где v — характерная скорость, l — характерный размер задачи, v_m — коэффициент магнитной диффузии среды.

Оценки показывают, что вследствие огромных размеров l в конвективной зоне Солнца $Rm \approx 10^6$, а, например, в межзвёздной среде Rm легко достигает значений более чем 10^8 . В то же время в обычных лабораторных и технических устройствах с движущимися жидкими проводниками Rm заметно меньше единицы. Для возникновения динамо нужно, чтобы Rm превысило пороговое значение, которое, конечно, зависит от геометрии системы. В самом благоприятном случае, который был найден сотрудником Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН) Ю.Б. Пономаренко [1] в 1973 г., это критическое значение равно 17. Потребовались усилия специалистов разных стран в течение почти полувека для того, чтобы на рубеже нового тысячелетия достичь этого критического значения в лабораторной установке и наблюдать самовозбуждение квазистационарного магнитного поля в лабораторных условиях. Практически все имеющиеся и планируемые лабораторные установки для изучения динамо в той или иной степени связаны с идеями работы Пономаренко, а воспроизведение в лаборатории более реалистических в астрофизическом контексте версий динамо остаётся пока делом будущего. Развитие исследования динамо от изучения астрономических моделей до проведения динамо-экспериментов прослежено в недавнем обзоре [2], где приведены ссылки по истории вопроса. В настоящей статье мы сосредоточим внимание на стороне проблемы, связанной с физикой Солнца.

Отметим, что работы в области динамо традиционно были и остаются областью активности отечественной физики. В частности, работы по динамо-экспериментам, начатые в 1960-х годах в Риге, были доведены до первого успешного динамо-эксперимента, однако этот успех был достигнут уже в другой стране. Принятое в 1960-е годы решение сделать Латвийскую ССР головной республикой по развитию магнитной гидродинамики привело 30 лет спустя к серьёзным проблемам для российской науки в этой области, которые, однако, со временем были разрешены, так что сейчас российские динамо-эксперименты, проводимые в Институте механики сплошных сред УрО РАН в Перми, занимают, наряду с экспериментами в Латвии, Германии, Франции и США, достойное место в изучении динамо.

2. Сценарий солнечного динамо в контексте современных наблюдений

Для самовозбуждения магнитного поля механизмом динамо недостаточно просто добиться больших Rm — согласно правилу Ленца, производимое электромагнитной индукцией магнитное поле не складывается с первоначально слабым затравочным магнитным полем, а вычитается из него. Поэтому в процессе динамо должны участвовать, как минимум, два контура, так что индуктивные эффекты в первом контуре создают магнитное поле во втором контуре, а индуктивные эффекты во втором контуре создают магнитное поле в первом, причём знаки этих полей должны быть подобраны так, чтобы совместное действие индуктивных эффектов привело к самовозбуждению.

В солнечном и других динамо в небесных телах магнитное поле в первом контуре представлено в виде магнитного поля обычного диполя (возможный вариант — квадруполь), зато магнитное поле второго контура, лежащее внутри конвективной зоны Солнца, направлено азимутально. Первое из полей принято называть полоидальным, а второе — тороидальным. Полоидальное магнитное поле преобразуется в тороидальное в результате дифференциального вращения среды, в которую магнитное поле вморожено. Для того чтобы найти движение, восстанавливающее полоидальное магнитное поле из тороидального, потребовались полвека и усилия нескольких научных групп. В 1955 г. американский астроном Ю. Паркер [3], основываясь на своей богатой интуиции, вывел для случая тонкой конвективной оболочки уравнения, связывающие между собой обе компоненты поля. Согласно этим уравнениям динамо-система Солнца в самом деле имеет собственную частоту, которую можно отождествить с частотой солнечного цикла.

Через десять лет маститый немецкий учёный М. Штенбек, ранее работавший над военными проектами немецкой фирмы "Сименс", а после этого проведший десять лет в Сухуми, где он, вероятно, много общался с будущим директором ИЗМИРАН В.В. Мигулиным, переключился на более академические задачи и вместе со своими студентами Ф. Краузе и К.-Х. Рэдлером вывел уравнения для эволюции среднего магнитного поля в случае зеркально-асимметричной конвекции (или турбулентности) [4]. Конвективные потоки во вращающихся телах оказываются зеркально-асимметричными, поскольку действие силы Кориолиса на вихри, всплывающие и опускающиеся в стратифицированной среде, приводит к различию среднего числа лево- и правовращающихся вихрей в данном полушарии небесного тела.

Не прошло и десяти лет, как специалисты прочитали статью [4], опубликованную в малоизвестном немецком журнале с использованием готического шрифта, и извлекли из дипломных работ молодых соавторов президента Академии наук Германской демократической республики формулы для оценки величины эффекта, названного немецкими авторами α -эффектом, который как раз и связывает тороидальное магнитное поле с полоидальным. Согласно этим оценкам длина солнечного цикла оказалась примерно на порядок короче наблюдаемой, что в течение долгого времени рассматривалось как трагическое несоответствие между теорией и наблюдениями. Хотя следует отметить, что ошибиться лишь на порядок при оценке ключевого и совершенно не известного из лабораторного эксперимента параметра процесса — это скорее успех, чем неудача.

Ещё через несколько лет, в 1972 г., Я.Б. Зельдович на ярком примере, получившем название восьмёрки Зельдовича, объяснил, что собственно происходит с магнитными линиями в астрофизических динамо. Сначала магнитная петля растягивается вдвое (с этим без труда справляется дифференциальное вращение), затем она сворачивается в восьмёрку, которая складывается пополам (для этого нужен α -эффект). При этом, как нетрудно проверить, происходит удвоение магнитного потока. В духе той героической эпохи Я.Б. Зельдович посчитал, что эту красивую идею достаточно высказать в ходе дискуссии на научной конференции в Кракове, так что она оказалась опубликованной позднее в составе других его работ (см., например, [5]).

За прошедшие десятилетия эта красивая, но несколько абстрактная схема была в самых разнообразных направлениях наполнена астрономическими наблюдениями и частично данными лабораторных экспериментов. Полный обзор этих результатов выходит далеко за рамки настоящей статьи, поскольку даже рассказ о методах и современном состоянии гелиосейсмологии, с помощью которой восстанавливается дифференциальное вращение во внутренних частях Солнца, потребовал бы специального большого обзора. Мы остановимся лишь на прогрессе в наблюдательном определении α -эффекта, которое долгое время считалось совершенно невыполнимой задачей. Отметим, что здесь мы не связываем α -эффект только с той его специальной формой, которая рассматривалась Паркером, а рассматриваем и ту его форму, в которой зеркальная асимметрия связывается с действием магнитной силы (так называемая схема Бабкока – Лейтона).

Суть проблемы заключается в том, что для наблюдательного определения α -эффекта, т.е. степени зеркальной асимметрии задачи, должны быть известны прежде всего все три компоненты поля скорости. Однако в астрономии скорость определяют, как правило, по эффекту Доплера, что даёт лишь компоненту скорости по лучу зрения. В следующем приближении должна быть известна также степень зеркальной асимметрии, которая связана с самым магнитным полем. Это уже легче, поскольку магнитное поле часто измеряется по эффекту Зеемана, который может давать все три компоненты магнитного поля. Эти компоненты необходимо ещё дифференцировать, что очень непросто, но в [6] была предложена жизнеспособная методика.

За прошедшие 30 лет несколько научных групп наблюдали в активных областях Солнца так называемую токовую спиральность, т.е. величину, определяющую вклад магнитного поля в α -эффект. Такие наблюдения становятся интересными для задачи солнечного динамо, если они покрывают значительную часть цикла или, что ещё лучше, весь солнечный цикл. Подобная настойчивость была проявлена астрономами Солнечной станции Хуайроу под Пекином. Специалисты по динамо из ИЗМИРАН благодаря продуманной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) приняли самое активное участие в обработке и интерпретации этих данных. Построенные в результате тщательной, трудоёмкой и кропотливой работы широтно-временные распределения токовой спиральности [7] вполне вписываются в концепцию динамо. Отметим, правда, что специалисты по теории динамо не удосужились вычислить, какое собственно распределение ожидается в простейших моделях солнечного динамо, так что обнаружение достаточно сложного, но регулярного распределения, согласующегося с этими представлениями [8], оказалось для них сюрпризом.

Позднее было осознано, что данные о регулярном распределении углов наклона магнитных биполярных структур, связанных с группами солнечных пятен (так называемый закон Джоя), стали достаточно богатыми для того, чтобы можно было сделать уверенные выводы [9] — удалось построить широтно-временные диаграммы для всего диапазона α -коэффициента [10], а далее удалось приспособить методы гелиосейсмологии для определения вклада в α -эффект поля скорости [11]. Примерно тогда же α -эффект научились измерять в лабораторных

магнитогидродинамических экспериментах с жидкими металлами [12]. Ввиду исключительной важности этого эффекта для динамо его целесообразно изучить со всех возможных сторон. В целом в этой области ещё много неясного, но то, что ранее казалось невозможным, перешло в практическую плоскость.

3. Данные из архивов и звёздные аналогии

Как это ни неожиданно, всё новые данные о солнечной активности поступают из астрономических архивов (см. обзор вопроса в [13]). Дело в том, что сразу же после внедрения телескопа в астрономические наблюдения Галилеем в 1611 г. наблюдение солнечных пятен стало предметом увлечения многих любителей и профессионалов, а через несколько десятилетий была основана Парижская обсерватория, главным направлением работы которой стал мониторинг солнечной активности. Большой вклад в организацию этих работ внёс король Людовик XIV — только его искренним интересом к этим наблюдениям можно объяснить саму возможность их проведения в течение достаточно длительного времени, несмотря на то что самым значительным их результатом оказался отрицательный результат. Именно в это время в солнечной активности произошёл долгий и глубокий спад, названный впоследствии по имени английского астронома начала XX в. минимумом Маундера. Во времена Маундера наличие этого минимума было предметом смелых догадок, затем его удалось подтвердить изотопными методами (солнечная активность влияет на динамику некоторых изотопов на Земле), но только в последнее десятилетие XX в. удалось реконструировать солнечную активность по архивным наблюдениям солнечных пятен в период минимума Маундера.

Работа над астрономическими архивами продолжается, причём выясняются различные нестандартные эпизоды в солнечном цикле, произошедшие в период инструментальных наблюдений Солнца. Эти эпизоды имеют различные сценарии, они дополняются нестандартным видом текущего цикла активности. Изотопные данные позволяют судить о более ранних минимумах активности, напоминающих минимум Маундера. В целом складывается картина систематических отклонений от нормального хода цикла, свидетельствующих о том, что работа солнечной динамо-машины далеко не сводится к автоколебаниям магнитного поля.

Работа по реконструкции истории солнечной активности во многом отличается от обычной работы физика или астронома — встают задачи интерпретации и критики исторических источников, более свойственные гуманитарным наукам.

Наиболее прямолинейное объяснение минимума Маундера и других особенностей солнечного цикла связано с тем, что управляющие параметры цикла являются некоторыми средними, вычисляемыми по сравнительно небольшому ансамблю конвективных ячеек. Некоторые из этих параметров (прежде всего α -коэффициент) сравнительно невелики, так что статистические флуктуации способны привести к значительным отклонениям в работе солнечного динамо [14, 15].

Естественное ожидание того, что цикл активности не является специальной чертой именно Солнца, подтверждается прежде всего наблюдениями временных вариаций

интегрального потока звёзд в некоторых специально подобранных спектральных линиях. Усилиями замечательного американского астронома Вильсона проведён охвативший несколько десятилетий мониторинг этих изменений для более чем ста звёзд [16]. Результаты этого мониторинга подтвердили наличие звёздных циклов, сопоставимых с солнечным, у многих звёзд, похожих на Солнце. Побочный результат проекта — впечатляющая демонстрация того, как трудно проводить многолетний мониторинг в рамках грантовой науки. Для французских астрономов эпохи Людовика XIV финансовые проблемы, связанные с проведением мониторинга, оказались гораздо более простыми — достаточно было королевской инициативы. Специалисты по интерпретации данных предприняли всё возможное для того, чтобы извлечь как можно больше физической информации из этих данных; в отдельных случаях удаётся даже построить широтно-временные диаграммы активности [17], однако очевидно, что возможности интегральных данных ограничены.

Замечательно, что начиная с 1980-х годов стало возможным картирование распределений температуры для отдельных звёзд, несмотря на то что эти звёзды не разрешаются телескопом. Это делается с помощью решения обратной задачи для некоторого интегрального уравнения, описывающего процесс формирования в звезде спектральных линий температурой, изменяющейся по поверхности звезды [18]. Впоследствии данная техника, являющаяся одним из наиболее впечатляющих достижений отечественной науки, получила название обратных доплеровских изображений. До сих пор в компьютерных кодах, применяемых во многих обсерваториях мира, тиражированы переписанные с перфокарт блоки программ, разработанных на рубеже 1980-х годов для ещё очень несовершенных отечественных компьютеров.

Можно было бы ожидать, что за прошедшие три десятилетия с помощью обратных доплеровских изображений удалось собрать богатый материал о строении волн активности в звёздах различных типов. К сожалению, на деле построить широтно-временные диаграммы этим методом удаётся лишь в исключительных случаях [19] (см. интерпретацию этих диаграмм в рамках теории динамо в [20]). Организация мониторинга звёздной активности с помощью этого метода до сих пор остаётся неразрешимой проблемой.

4. Прямое численное моделирование динамо

Уже в течение около 20 лет компьютерные мощности и методы компьютерного моделирования позволяют проводить прямое моделирование задачи динамо, не отделяя специально уравнения для крупномасштабных переменных задачи. Впервые это удалось осуществить для задач геодинамо [21], возможно, потому, что мы знаем о гидродинамике жидкого внешнего ядра Земли меньше, чем о течениях в глубине конвективной зоны Солнца. Постепенно возможности прямого численного моделирования расширяются, позволяя проводить его при всё более реалистичных значениях управляющих параметров. В настоящее время прямым численным моделированием геодинамо занимается ряд научных групп в различных странах мира, в том числе группа М.Ю. Решетняка в Институте физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН и в ИЗМИРАН [22]. С другой стороны, усложняется

и становится всё более реалистичным описание солнечного динамо в рамках моделей среднего поля (см., например, [23]).

В целом, намечается возможность научно-обоснованного прогноза солнечного цикла. Сам цикл имеет длительность, сопоставимую с временем творческой активности специалистов: поскольку число солнечных пятен не фиксирует знак магнитного поля, номинальному 11-летнему циклу отвечает физический 22-летний цикл. Поэтому выполнение этой амбициозной задачи займёт, вероятно, как минимум, жизнь целого научного поколения.

Отметим, что концентрация усилий специалистов по геодинамо преимущественно на методах прямого численного моделирования во многом связана с исключительной сложностью этой задачи, в которой магнитные силы, как считается, могут существенно перестроить течения внутри жидкого ядра Земли. Конечно, поиск сравнительно простых (см., например, [24]) скейлингов в этой области остаётся также притягательной, хотя и труднодостижимой целью.

Преимущества прямого численного моделирования в решении подобных задач очевидны, поэтому стоит сказать о концептуальных трудностях, выявившихся за два десятилетия. Оказывается, что прямое численное моделирование в гораздо большей степени обладает качествами экспериментальной, а не теоретической физики. В частности, оно хорошо отвечает на вопрос: "что происходит?" — но прямо не отвечает на вопрос: "почему это происходит?"

Более специфическая трудность связана с задачей постпроцессинга. Дело в том, что результат прямого численного моделирования в виде огромной таблицы чисел, например, распределения магнитного поля, редко представляет непосредственный научный интерес. Требуется выделить из этой огромной и не всегда разумно упорядоченной информации тот сравнительно небольшой набор данных, который действительно представляет интерес для исследователя. Оказывается, что построение подобных величин на основе данных прямого численного моделирования часто является существенно более сложной, как с концептуальной, так и с вычислительной точек зрения, задачей, чем проведение исходного моделирования [25]. (О проблемах постпроцессинга в задаче о вычислении α -эффекта по данным прямого моделирования см. [26].)

5. Динамо-волны с точки зрения теоретической физики

Представляется, что динамо-волны, как и другие проявления работы механизма динамо, заслуживают изучения как объекты теоретической, а по мере возможности и экспериментальной, физики вне специального астрономического контекста. С этой точки зрения представляется интересным, что можно провести формальную аналогию между волнами вероятности квантовой механики и динамо-волнами и использовать методы и понятия квантовой механики, прежде всего квазиклассического приближения, для изучения динамо-волн. Как всегда, новое — это отчасти хорошо забытое старое: само квазиклассическое приближение возникло в квантовой механике как обобщение коротковолнового приближения в теории разнообразных волн в жидкостях.

В рамках этого подхода удаётся выписать дисперсионное соотношение для динамо-волн в конвективной зоне Солнца [27]. Дисперсионное соотношение (или, говоря более математизированным языком, уравнение Гамильтона–Якоби) уже в простейшем случае оказывается алгебраическим уравнением четвёртого порядка для импульса волны с комплексными коэффициентами, включающим в себя в качестве параметра собственную частоту γ , которая тоже, конечно, оказывается комплексной величиной. Действительная часть γ даёт собственно скорость роста, а мнимая — круговую частоту солнечного цикла. Естественно, комплексным оказывается и импульс динамо-волны. Это отражает тот физический факт, что распространение динамо-волны неотделимо от процесса её генерации. Звуковую или электромагнитную волну можно возбудить в специальном устройстве, а затем изучать её распространение относительно независимо от того, как именно возбуждена волна. Напротив, динамо-волна экспоненциально быстро затухает вне области работы динамо. Более того, и внутри самой области работы динамо амплитуда такой волны очень сильно изменяется от точки к точке. В результате многие привычные идеи физики волновых явлений предстают в совершенно необычном виде, например явление резонанса, которое прежде всего привлекает внимание при изучении привычных колебаний и волн. Однако явление резонанса, как учит теория дифференциальных уравнений, обусловлено фактом совпадения двух или нескольких частот, а не конкретным видом уравнения, в явлении динамо оно тоже, конечно, имеет место, однако с трудом выделяется на фоне гораздо более ярких изменений, связанных с изменениями параметров динамо [28].

Дисперсионное соотношение четвёртого порядка, естественно, имеет четыре корня, значения которых определённым образом изменяются по широте конвективной зоны. Сшивание двух из них на широте наибольшей интенсивности генерации даёт γ . При этом оказывается, что максимальное значение амплитуды волны заметно смещено от точки максимума генерации магнитного поля. В рамках квантово-механической аналогии это означает, что квантовая частица в основном состоянии располагается где-то на стенке потенциальной ямы вдали от её дна. Знак действительной части импульса в основном диапазоне частот и при подходящем знаке управляющих параметров динамо обеспечивает, в соответствии с наблюдениями, распространение волны от средних широт к экватору, однако в высоких широтах направление распространения изменяется и волна бежит к полюсу. Это явление известно наблюдательно [29].

В более сложных моделях динамо порядок дисперсионного уравнения повышается [30], а распространение динамо-волн становится ещё более сложным [31], в частности могут возникать стоячие динамо-волны [32] и стоячие волны активности [33].

Связь между квантовой механикой и теорией динамо имеет и другую сторону: α -эффект связан со спиральностью течений и магнитных полей. В привычной физике

спиральность не играет ведущей роли, зато она является одной из важных величин в теории нейтрино и физике слабого взаимодействия. В этом аспекте концепции физики микромира и астрофизики смыкаются, а явление несохранения пространственной чётности в микромире с точки зрения динамо проявляется как α -эффект [34].

Работа поддержана проектом РФФИ 15-02-01407.

Список литературы

1. Пономаренко Ю Б *Журн. прикл. мех. тех. физ.* (6) 47 (1973); Ponomarenko Yu B *J. Appl. Mech. Tech. Phys.* **14** 775 (1973)
2. Соколов Д Д, Степанов Р А, Фрик П Г *УФН* **184** 313 (2014); Sokoloff D D, Stepanov R A, Frick P G *Phys. Usp.* **57** 292 (2014)
3. Parker E N *Astrophys. J.* **122** 293 (1955)
4. Steenbeck M, Krause F, Rädler K-H *Z. Naturforsch. A* **21** 369 (1966)
5. Вайнштейн С И, Зельдович Я Б *УФН* **106** 431 (1972); Vainshtein S I, Zel'dovich Ya B *Sov. Phys. Usp.* **15** 159 (1972)
6. Seehafer N *Solar Phys.* **125** 219 (1990)
7. Zhang H et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc. Lett.* **402** L30 (2010)
8. Шу Х и др. *Астрон. журн.* **86** 182 (2009); Xu H et al. *Astron. Rep.* **53** 160 (2009)
9. Stenflo J O, Kosovichev A G *Astrophys. J.* **745** 129 (2012)
10. Tlatov A et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **432** 2975 (2013)
11. Komm R, Gosain S *Astrophys. J.* **798** 20 (2015)
12. Stepanov R et al. *Phys. Rev. E* **73** 046310 (2006)
13. Soon W W-H, Yaskell S H *The Maunder Minimum and the Variable Sun-Earth Connection* (River Edge, N.J.: World Scientific, 2003); Сун В, Яскелл С *Минимум Маундера и переменные солнечно-земные связи* (М. – Ижевск: РХД, Ин-т компьютер. исслед., 2008)
14. Moss D et al. *Solar Phys.* **250** 221 (2008)
15. Choudhuri A R, Karak B B *Phys. Rev. Lett.* **109** 171103 (2012)
16. Baliunas S L et al. *Astrophys. J.* **438** 269 (1995)
17. Katsova M M et al. *New Astron.* **15** 274 (2010)
18. Гончарский А В и др. *Астрон. журн.* **59** 1146 (1982); Goncharskii A V et al. *Sov. Astron.* **26** 690 (1982)
19. Berdyugina S V, Henry G W *Astrophys. J.* **659** L157 (2007)
20. Moss D, Sokoloff D, Lanza A F *Astron. Astrophys.* **531** A43 (2011)
21. Glatzmaier G A, Roberts P H *Science* **274** 1887 (1996)
22. Pipin V V, Kosovichev A G *Astrophys. J.* **776** 36 (2013)
23. Hejda P, Reshetnyak M *Phys. Earth Planet. Inter.* **177** 152 (2009)
24. Bassom A P, Soward A M, Starchenko S V *J. Fluid Mech.* **689** 376 (2011)
25. Степанов Р А, в сб. *XIX Зимняя школа по механике сплошных сред, Пермь, 24–27 февраля 2015 г.* (Пермь: Ин-т механики сплошных сред УрО РАН, 2015) с. 354
26. Brandenburg A, Sokoloff D *Geophys. Astrophys. Fluid Dyn.* **96** 319 (2002)
27. Kuzanyan K, Sokoloff D *Geophys. Astrophys. Fluid Dyn.* **81** 113 (1995)
28. Moss D, Sokoloff D *Astron. Astrophys.* **553** A37 (2013)
29. Makarov V I, Sivaraman K R *Solar Phys.* **85** 227 (1983)
30. Popova H, Artyushkova M, Sokoloff D *Geophys. Astrophys. Fluid Dyn.* **104** 631 (2010)
31. Soward A M et al. *Geophys. Astrophys. Fluid Dyn.* **107** 667 (2013)
32. Baliunas S et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **365** 181 (2006)
33. Obridko V N et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **365** 827 (2006)
34. Semikoz V B, Sokoloff D D *Phys. Rev. Lett.* **92** 131301 (2004)

Problems of magnetic dynamo

D.D. Sokoloff

Department of Physics, M.V. Lomonosov Moscow State University,

Leninskie gory 1, str. 2, 119991 Moscow, Russian Federation;

N.V. Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation, Russian Academy of Sciences,

Kaluzhskoe shosse 4, 142190 Troitsk, Moscow, Russian Federation

E-mail: sokoloff.dd@gmail.com

In what is famously known as the solar activity cycle, every 11 years a wave of quasistationary magnetic field propagates in the solar convective zone from the middle latitudes equatorwards, driven by the dynamo jointly produced by the differential rotation and mirror-asymmetric convection. Similar processes occur in other celestial bodies and can to some extent be reproduced in the lab environment. This paper reviews the current status of and future trends in the study of the dynamo problem.

Keywords: magnetic fields, dynamo, solar activity

PACS numbers: 07.55.Db, **41.20.–q**, **91.25.–r**, 96.12.Hg, 96.60.Hv

DOI: 10.3367/UFNr.0185.201506h.0643

Bibliography — 34 references

Received 20 March 2015

Uspekhi Fizicheskikh Nauk **185** (6) 643–648 (2015)

Physics–Uspekhi **58** (6) (2015)