

ГЕНЕРАЦИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В ГЛУБИННЫХ НЕДРАХ ЗЕМЛИ И ПЛАНЕТ

С. В. Старченко

Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н. В. Пушкова Российской академии наук (ИЗМИРАН)

В обзоре представлены исследования учёных ИЗМИРАН (1988–2014) по теоретическому определению основных механизмов генерации магнитного поля и порождающей его конвекции в глубинных недрах Земли и планет.

Работа частично поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (проект № 13-05-00893).

Ключевые слова: геодинамо, магнетизм планет, конвекция, глубинные недра планет.

1. ВВЕДЕНИЕ И КРАТКАЯ ИСТОРИЯ ПЕРСОНАЛЬНЫХ ВКЛАДОВ

Теория генерации планетарных магнитных полей переживает в настоящее время свой расцвет. Уже получены численные, теоретические и экспериментальные результаты, однозначно свидетельствующие о том, что генерация магнитных полей планет осуществляется преимущественно конвективными течениями проводящей жидкости. В ряду этих результатов наиболее значимыми являются проводимые многими успешно моделирующие генерацию планетарных магнитных полей суперкомпьютерные эксперименты, которые инициировали авторы работы [Glatzmaier, Roberts, 1995]. Ими впервые во вращающемся сферическом слое было получено полноценное решение сложной системы уравнений гидромагнитного динамо, состоящей из уравнений тепломассопереноса, Навье–Стокса, и Максвелла. Но это потребовало искусственного завышения эффективных коэффициентов переноса для получения описания мелкомасштабных структур. При этом были выведены законы подобия, которые экстраполировались в область параметров реальных динамо планет.

По сравнению с такими численными исследованиями развиваемые в ИЗМИРАН асимптотические подходы, хотя и остаются приближёнными, но зато позволяют напрямую исследовать более широкую область *реальных* параметров, дополняя, обобщая и указывая на области параметров необходимых численных исследований. С подобных упрощённых подходов и начиналась теория гидромагнитного динамо планет.

В 1988 г. в ИЗМИРАН А.А. Рuzмайкин и в ту пору его аспирант С. В. Старченко вместе с коллегами разработали и начали применять подобный методу ВКБ (Вентцеля–Крамерса–Бриллюэна) из квантовой механики асимптотический подход MEGA [Ruzmaikin et al., 1990]. В следующем

Старченко Сергей Владимирович — заведующий отделом, доктор физико-математических наук, профессор, sstarchenko@mail.ru

разделе резюмируется, как они на основе решения проблемы кинематического динамо успешно предсказали наклон магнитного диполя Нептуна [Ruzmaikin, Starchenko, 1991]. В третьем разделе кратко представлены ключевые результаты работ С. В. Старченко и М. С. Котельниковой по определению критических параметров планетарной конвекции в приближении быстрого вращения, когда асимптотически мала эффективная вязкость. Четвёртый раздел посвящён проводимым с 2010 г. совместным исследованиям Старченко с Ю. Д. Пушкаревым (Институт геологии и геохронологии докембрия Российской академии наук, ИГГД РАН), которые разработали и развивают концепцию растворяющегося протоядра Земли и планет. Эта концепция позволяет решить не только энергетические проблемы с долговременной работой геодинамо, но и в перспективе объяснить образование плюмов у подошвы мантии. Раздел 5 посвящён проводимым в ИЗМИРАН в последнее десятилетие исследованиям по асимптотическому и численному выводу законов подобия для гидродинамики и магнетизма планет, которые определяются энергетикой тепломассопереноса в их недрах. В разделе 6 резюмируются исследования по выявлению эффектов генерации и диссипации кинематического геодинамо исходя из эволюции наблюдаемого главного магнитного поля, которые были начаты в 2009 г. Старченко и В. В. Ивановым.

2. МЕТОД MEGA, КИНЕМАТИЧЕСКОЕ ГЕОДИНАМО И ПРЕДСКАЗАНИЕ НАКЛОНА ДИПОЛЯ НЕПТУНА

Аббревиатура MEGA переводится как метод максимально эффективной генерации. Идея метода в том, что локальное решение задачи кинематического динамо средних определяется там, где суммарные эффекты генерации наиболее значимы. Гидромагнитное динамо — явление пороговое, так как для возбуждения магнитного поля необходимо чтобы эффекты генерации доминировали над диссипацией. Главный для планетарного динамо — α -эффект имеет размерность скорости, определяется гидромагнитной спиральностью мелкомасштабных течений и физически соответствует генерации тока преимущественно параллельного среднему магнитному полю, которое определяется усреднением реального поля по его возможным статистическим реализациям. Динамо, основанное исключительно на α -эффекте, называют α^2 -динамо. Такое динамо, подобно геодинамо, характеризуется практически стационарным полем, испытывающим небольшие кратковременные вариации (порядка сотен лет для Земли) и долговременные полные инверсии (порядка миллиона лет для Земли). Наличие слабого омега эффекта в геодинамо необходимо для объяснения физической природы наблюдаемого дрейфа геомагнитных неоднородностей. Омега эффект — это измеряемое градиентом скорости дифференциальное вращение, которое из проникающего к наблюдателю полоидального магнитного поля создаёт скрытое в проводящем ядре планеты тороидальное поле. Альфа-эффект замыкает цикл генерации — генерируя из тороидального поля плоидальное. Для такого динамо методом MEGA было найдено в широком диапазоне параметров приближённое асимптотическое решение,

определяющее критические пороги, частоты и структуры генерируемых полей для кинематических геодинамо, динамо планет Солнечной системы, Солнца и галактик. Это решение и было кандидатской диссертацией С. В. Старченко. Оно хорошо согласовывалось с наблюдениями и точными численными решениями, имея при этом несравненно больший прогностический и обобщающий физический потенциал, что и было подтверждено работой [Starchenko, Kono, 1996].

В 1986 г. измеренное космическим аппаратом «Вояджер-2» магнитное поле Урана аппроксимировали диполем, наклонённым на 59° к оси вращения. На основании этих измерений и известных моделей внутреннего строения планеты Старченко сделал вывод о том, что особенностями определяющими генерацию такого необычного магнитного поля может быть тонкость области динамо и ионный характер её проводимости. Строение Нептуна в основном подобно Урану, но имеющиеся небольшие отличия позволили заключить, что наклон магнитного диполя Нептуна должен быть около 45° . В начале 1988 г. это предсказание вместе с кинематической теорией генерации магнитных полей Урана и Нептуна было направлено Румзайкиным и Старченко в журнал «Космические исследования», а опубликовано в 1989 г. Позже в этом же году «Вояджер-2» пролетел рядом с Нептуном. Полученные при этом измерения аппроксимировали диполем, наклонённым на 47° к оси вращения, что подтвердило предсказание Старченко и Румзайкина.

3. КРИТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ КОНВЕКЦИИ В НЕДРАХ ПЛАНЕТ И ЛУН

Исследуются уравнения конвекции в почти адиабатическом приближении [Starchenko et al., 2006], для которых выбор физических параметров был обусловлен возможными приложениями к описанию гидродинамики глубинных недр Земли, а также планет и лун земной группы. Для исследования линейной устойчивости в пределе быстрого вращения исходная система уравнений в частных производных впервые сведена к системе обыкновенных дифференциальных уравнений для давления и проекции скорости на ось вращения [Старченко, Котельникова, 2013]. Критические частоты, числа Рэлея и решения, описывающие возникающую конвекцию, получены асимптотически и численно при наиболее интересных для практических приложений числах Прандтля и толщинах сферических слоёв. Впервые получено полностью аналитическое решение типа ВКБ в пределе, когда радиус внутренней границы рассматриваемого сферического слоя мал по сравнению с внешним радиусом и источники конвективной неустойчивости концентрируются у внутренней границы. На рис. 1 в относительных единицах (пропорциональных огромному вращательному числу Рейнольдса) приведены 3D-графики для критической частоты ω и числа Рэлея Ra в зависимости от числа Прандтля Pr и отношения b внутреннего радиуса жидкого ядра к его внешнему радиусу. Полученные значения Ra задают минимальную энергетическую подпитку динамо планет, а ω согласуются с наблюдаемыми геомагнитными вариациями.

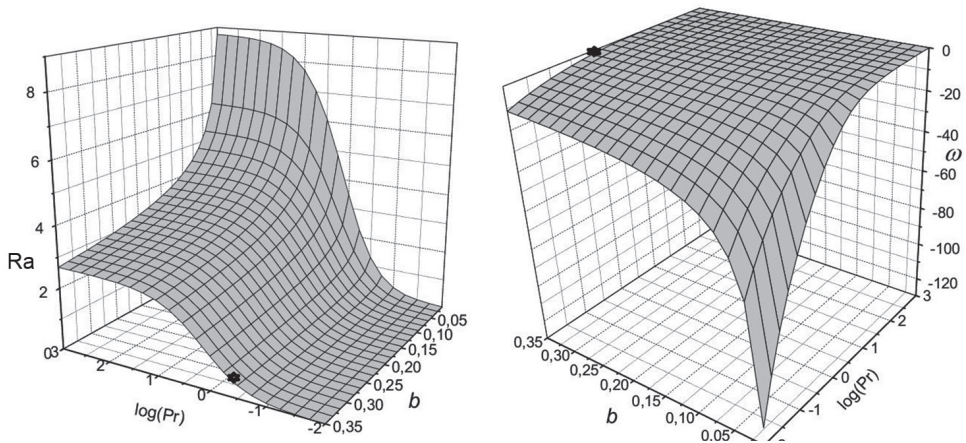


Рис. 1. Критическое число Рэля (слева) и частота (справа); шестерёнка — точное решение

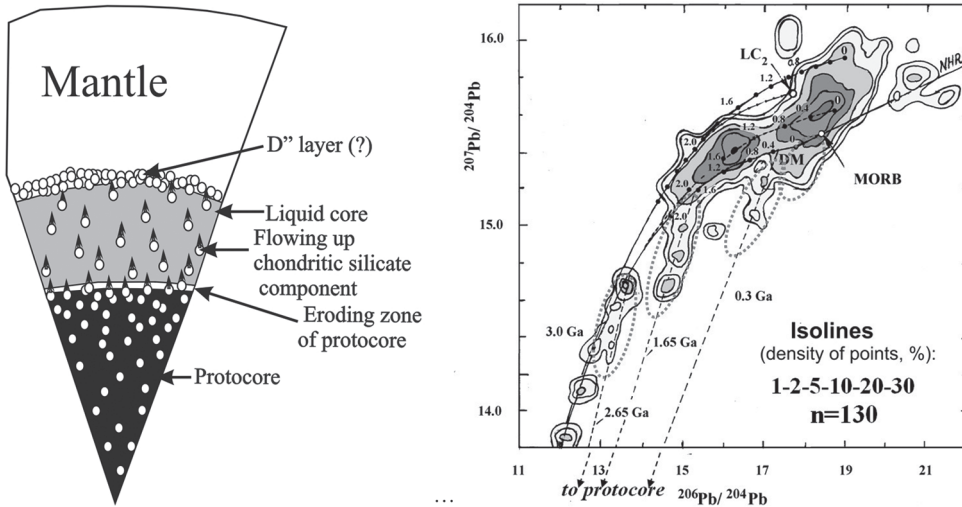


Рис. 2. Схема эволюции ядро-мантия и изотопная систематика магматических пород

4. КОНЦЕПЦИЯ РАСПЛАВЛЯЮЩЕГОСЯ ПРОТОЯДРА ЗЕМЛИ, МАРСА И МЕРКУРИЯ

Решения, иллюстрируемые рис. 1 при малых значениях b и больших Pr , актуальны для древнего (0,5...2 Гс) геомагнитного поля и древнейшего (2...4,5 Гс) магнитного поля Марса, если, следуя общепринятой концепции, считать, что вскоре после аккреции планеты образовалось массивное жидкое ядро, из которого начало кристаллизоваться твёрдое ядро. При этом остановка динамо Марса происходит тогда, когда твёрдое ядро вырастает до слишком большого размера близкого к размеру всего ядра.

Поскольку это противоречит известным моделям строения Марса, то предлагается альтернативная концепция протоядра [Starchenko, Pushkarev, 2013], которая значительно лучше согласуется с энергетикой системы ядромантия в Земле, палеомагнитными и изотопными данными (рис. 2).

При этом после аккреции так же образовалось жидкое ядро, но под ним было более массивное и плотное протоядро, которое миллиарды лет растворялось в жидком ядре. При растворении из протоядра выделяется лёгкая фракция, которая всплывая к границе с мантией, порождает мощную композиционную конвекцию, генерирующую магнитное поле и под-держивающую конвекцию в мантии. Следуя концепции протоядра, в современном Марсе уже давно остановился рост жидкого ядра за счёт твёрдого протоядра, что привело к остановке динамо и конвекции в мантии. В Меркурии же протоядро, по-видимому, всё ещё продолжает замедленно растворяться под влиянием приливных воздействий Солнца дополнительно перегревающих жидкое ядро, что и приводит к необычно малому и сдвинутому к полюсу магнитному диполю.

5. ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ МАСШТАБИРОВАНИЕ ГЕОДИНАМО И ГИДРОМАГНИТНОГО ДИНАМО ПЛАНЕТ

В пределе пренебрежимо малых транспортных коэффициентов [Starchenko, Jones, 2002] выведены законы подобия для конвекции и магнетизма в быстро вращающихся планетах [Starchenko, 2014; Starchenko, Pushkarev, 2013]. Магнитная энергия преобладает над кинетической энергией (отношение этих энергий равно d^2/h^2 , которые определены ниже) в Земле, Юпитере, Сатурне и древнейшем Марсе. В этих планетах типичное магнитное поле B определяет поток плавучести F , движущий конвекцию. При этом магнитный закон подобия $B = (\mu\rho)^{1/2}(FH)^{1/3}$ не зависит от проводимости σ и угловой скорости вращения Ω . Здесь H — толщина сферического слоя; μ — магнитная проницаемость [Гн/м]; ρ — плотность. Аналогичный закон подобия был получен компиляцией множества численных моделей динамо. Кроме того получены законы подобия для следующих типичных величин: скорости V , гидродинамического размера h , ускорения плавучести A , электромагнитного размера d и синуса угла между магнитным полем и скоростью s , а именно

$$V^5 = F^2 H / \Omega, h^5 = F H^3 / \Omega^3, A^5 = F^3 \Omega / H, d^{15} = F^2 / H^4 \Omega^6, s = d / H.$$

В недрах Меркурия, Урана, Нептуна и Ганимеда локальное число Рейнольдса $r_m = \mu\sigma V d$ порядка единицы или мало. Соответствующее малое магнитное поле определяет новый закон $B = (\mu\rho)^{1/2} V$.

6. ВЫЯВЛЕНИЕ ЭФФЕКТОВ ГЕОДИНАМО ИСХОДЯ ИЗ НАБЛЮДАЕМОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

В работе [Старченко, Иванов, 2013] оригинальными методами теории гидромагнитного динамо и SOMPI исследована общепризнанная геомагнитная модель IGRF (International Geomagnetic Reference Field) с 1900

по 2010 г. Показано, что главная — осевая компонента геомагнитного диполя из-за магнитной диффузии в ядре Земли [Старченко, 2011] имеет тенденцию уменьшиться в e раз за 2110 лет. Этот временной интервал позволяет уточнить значение проводимости ядра, грубо оценить конфигурацию токового источника осевого диполя в ядре и минимально возможное время, отделяющее нас от грядущей инверсии или экскурса. Перпендикулярная оси вращения дипольная компонента имеет дрейфующую составляющую, огибающую Земной шар за 46 тыс. лет, а 98 и 540 лет — интервалы роста в e раз для генерирующей составляющей. Эти составляющие позволяют оценить кинематические α - и ω -эффекты, которые определяют работу геодинамо и частоту инверсий.

ЛИТЕРАТУРА

- [Старченко, 2011] *Старченко С. В.* Гармонические источники главного геомагнитного поля // Геомагнетизм и аэрономия. 2011. Т. 51. № 3. С. 412–418.
- [Старченко, Иванов, 2013] *Старченко С. В., Иванов В. В.* Природа диффузии, генерации и дрейфа геомагнитного диполя с 1900 по 2010 гг. // Докл. Акад. наук (ДАН). 2013. Т. 448. № 1. С. 89–91.
- [Старченко, Котельникова, 2013] *Старченко С. В., Котельникова М. С.* Критическая устойчивость почти адиабатической конвекции во вращающемся быстро и широком сферическом слое // Журн. эксперим. и теор. физики (ЖЭТФ). 2013. Т. 143. Вып. 2. С. 388–396.
- [Glatzmaier, Roberts, 1995] *Glatzmaier G. A., Roberts P. H.* A three-dimensional convective dynamo solution with rotating and finitely conducting inner core and mantle // Phys. Earth Planet. Inter. 1995. V. 91. P. 63–75.
- [Ruzmaikin, Starchenko, 1991] *Ruzmaikin A. A., Starchenko S. V.* On the origin of Uranus and Neptune magnetic fields // Icarus. 1991. V. 93. P. 82–87.
- [Ruzmaikin et al., 1990] *Ruzmaikin A. A., Shukurov A. M., Sokoloff D. D., Starchenko S. V.* Maximally-Efficient-Generation Approach in the dynamo theory // Geophys. Astro. Fluid Dynamics. 1990. V. 52. С. 125–139.
- [Starchenko, 2014] *Starchenko S. V.*, Analytic base of geodynamo-like scaling laws in the planets, geomagnetic periodicities and inversions // Geomagnetism and Aeronomy. 2014. V. 54. No. 6. P. 694–701.
- [Starchenko, Jones, 2002] *Starchenko S. V., Jones C. A.* Typical velocities and magnetic field strengths in planetary interiors // Icarus. 2002. V. 157. P. 426–435.
- [Starchenko, Kono, 1996] *Starchenko S. V., Kono M.* Comparison of numerical solutions with MEGA asymptotics of $\alpha\omega$ -dynamo problem // Geophys. Astro. Fluid. 1996. V. 82. P. 93–123.
- [Starchenko, Pushkarev, 2013] *Starchenko S. V., Pushkarev Y. D.* Magnetohydrodynamic scaling of geodynamo and planetary protocore concept // Magnetohydrodynamics. 2013. V. 49. No. 1. P. 35–42.
- [Starchenko et al., 2006] *Starchenko S. V., Kotelnikova M. S., Maslov I. V.* Marginal stability of almost adiabatic planetary convection // Geophys. Astro. Fluid. 2006. V. 100. P. 397–428.

GENERATION OF MAGNETIC FIELD IN THE DEEP INTERIORS OF THE EARTH AND PLANETS

S. V. Starchenko

Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation of Russian Academy of Sciences (IZMIRAN)

Since 1988 till 1996 in IZMIRAN, A. Ruzmaikin and at that time his graduate student S. Starchenko with colleagues have developed and started to use an asymptotic approach MEGA for mean field kinematic dynamos in planets, stars and galaxies. The most interesting result in this field was their successful prediction of magnetic dipole tilt of Neptune. Further Starchenko and his graduate student M. Kotelnikova are worked and still are working on critical parameters of planetary convection in the approximation of fast rotation when the effective viscosity is asymptotically low. Current joint researches lead by Starchenko and Y. Pushkarev (IGGD RAS) with other IZMIRAN colleagues formulate, develop and promote the concept of dissolved protocore of the Earth and planets. This concept solves internal planetary power source problems not only with the long-term work geodynamo, but also in the long term to explain the formation of plumes at the base of the mantle. Modern asymptotic and numerical researches of Starchenko with Jones and Cristensen for the scaling laws of planetary hydrodynamics and magnetisms are determined by energy heat and mass transfers. While Starchenko's, Ivanov's and other IZMIRAN colleagues' researches identify the effects of the generation and dissipation of kinematic geodynamo based on the observed evolution of the Main magnetic field.

Keywords: geodynamo, planetary magnetism, convection, deep interiors of the planets.

Starchenko Sergey Vladimirovich — head of department, doctor of physical and mathematical sciences, professor, sstarchenko@mail.ru