

УДК 004

**ФЕНОМЕН ЭВОЛЮЦИИ ПЛАНЕТАРНОГО ЯДРА И МАГНИТНОГО  
ПОЛЯ ГАНИМЕДА****Семкин Г.Г.***студент,**Белгородский государственный национальный исследовательский институт**Белгород, Россия<sup>1</sup>***Аннотация.**

В статье рассматривается проблема происхождения и поддержания магнитного поля Ганимеда – крупнейшего спутника Юпитера и единственного спутника в Солнечной системе, обладающего собственной магнитной генерацией. Авторы анализируют традиционные теории (конвекция в твёрдом ядре, механизм «железных осадков») и предлагают новую модель, согласно которой ядро Ганимеда всё ещё находится в стадии формирования. Ключевая роль отводится системе Fe–FeS с низкой температурой плавления, которая обеспечивает длительную работу магнитного динамо за счёт постепенного нагрева мантии и оседания железа в растущее протоядро. Проводится сравнение с Каллисто, развивавшимся по «холодному» сценарию, и с Европой, где формирование ядра менее вероятно. Обосновывается вывод, что понимание эволюции ядра Ганимеда позволяет экстраполировать критерии возникновения магнитных полей на спутники экзопланетных систем.

**Ключевые слова:** космология, спутники Юпитера, солнечная система, эволюция магнитного поля, факторы формирования планетного ядра.

---

<sup>1</sup>Научный руководитель: **Яценко Ю.Н.**, к.филол.н., доцент, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, Белгород, Россия.  
Дневник науки | [www.dnevniknauki.ru](http://www.dnevniknauki.ru) | СМИ Эл № ФС 77-68405 ISSN 2541-8327

## ***THE PHENOMENON OF THE EVOLUTION OF PLANETARY CORE AND MAGNETIC FIELD OF GANYMEDE***

***Semkin G.G.***

*student,*

*Belgorod State National Research Institute*

*Belgorod, Russia<sup>2</sup>*

### **Abstract.**

This paper addresses the origin and maintenance of the magnetic field of Ganymede, the largest moon of Jupiter and the only satellite in the Solar System known to generate its own magnetic field. The authors review traditional theories (convection within a fully formed core, “iron snow” mechanism) and propose a new model in which Ganymede’s core is still undergoing active formation. A key role is attributed to the Fe–FeS system with its lower melting point, which sustains a long-lived magnetic dynamo through gradual mantle heating and iron differentiation into a growing proto-core. A comparison is made with Callisto, which followed a colder evolutionary path, and with Europa, where core formation appears less likely. The findings suggest that understanding Ganymede’s core evolution helps establish criteria for the emergence of magnetic fields on exoplanetary satellites.

**Keywords:** cosmology, the satellites of Jupiter, evolution of magnetic core, criteria of planetary core formation.

Вселенная характеризуется необъятностью и, вероятно, бесконечностью. Только в галактике Млечный Путь насчитывается не менее 100 миллиардов планет, из которых не менее 10 миллиардов относятся к земному типу и потенциально могут служить колыбелью для разнообразных биологических

---

<sup>2</sup>*Scientific supervisor: Yatsenko Yu.N., PhD, Associate Professor, Belgorod State National Research University, Belgorod, Russia.*

форм. Однако и в Солнечной системе, включая планетную систему, вмещающую Землю, сохраняется множество нерешённых вопросов, несмотря на относительно детальное изучение человеком. Среди объектов межпланетного интереса особое место занимает Юпитер, а именно один из его спутников – Ганимед. Ганимед является не только крупнейшим спутником Юпитера, но и самым большим спутником в Солнечной системе, а также одним из немногих, обладающих обширным ледяным океаном. Уникальность этого тела, сопоставимого по размерам с планетой, дополняется тем фактом, что среди сотен спутников Солнечной системы Ганимед генерирует собственное магнитное поле. Наличие металлического ядра и, как следствие, магнитного поля – это парадокс, который, согласно классическим моделям, не должен существовать. Вопреки распространённому мнению, что это явление возникает за счёт конвекции в уже сформированном ядре, данная гипотеза остаётся неточной, а связанные с ней положения требуют тщательной проверки. Новая модель внутренней эволюции Ганимеда предполагает иные процессы, способствующие генерации и поддержанию магнитного поля этого спутника, обладающего свойствами, поразительными как в сравнении с аналогичными объектами, так и с планетами. Ганимед представляет собой типичный ледяной спутник внешней Солнечной системы: его состав примерно на 60% состоит из силикатных пород и металлов и на 40% из водяного льда. Согласно новой модели, ядро Ганимеда всё ещё находится в процессе формирования, и именно этот процесс является одним из главных факторов, управляющих магнитным полем спутника. Магнитные поля небесных тел создаются посредством активной магнитной генерации (динамо-механизма) – естественного явления, при котором движение электропроводящей жидкости (например, расплавленного железа в ядре планеты или плазмы в звезде) генерирует и поддерживает магнитное поле [3]. Существует также теория, согласно которой магнитное поле Ганимеда создаётся конвекцией так называемых «железных осадков»: затвердевшие железные хлопья опускаются сквозь жидкое ядро, что индуцирует магнитное поле. Процесс

Дневник науки | [www.dnevniknauki.ru](http://www.dnevniknauki.ru) | СМИ Эл № ФС 77-68405 ISSN 2541-8327

аккреции при формировании планетарного тела способен генерировать тепло, необходимое для существования ядра, за счёт дифференциации металлов. Этот процесс представляет собой «магнитное динамо». Как правило, при достаточном нагреве в результате аккреции данный этап завершается в интервале от 1 до 200 миллионов лет после образования Солнечной системы (возраст которой в настоящее время составляет около 4,6 миллиарда лет). Впоследствии магнитное поле утрачивает былую силу и рассеивается. Вследствие этого многие спутники Солнечной системы, в частности Луна, сформировали остывшие ядра, которые более не генерируют подобных процессов [4]. Даже Марс, лишь немногим превосходящий Ганимед по размерам, уже прошёл все стадии этого алгоритма и в настоящее время не обладает собственным внутренним магнитным полем.

Некоторые небесные тела вообще никогда не нагреваются до температур, достаточных для формирования ядра, и, как следствие, не создают собственного магнитного поля. Это объясняется тем, что отдельные ледяные спутники, вероятно, образовались после распада радиоактивного алюминия, который мог способствовать нагреву их недр, но при этом они слишком малы, чтобы сформировать металлическое ядро только за счёт аккреционного тепла. Это обстоятельство может задерживать или полностью предотвращать процесс образования ядра [1]. Всё это, в свою очередь, ставит вопрос: почему на Ганимеди до сих пор существует и активно действует магнитное поле? Поскольку имеются существенные доказательства наличия у Ганимеда металлического ядра и одновременно активного магнитного поля, следует предположить, что повышение температуры в ядре либо не произошло, либо было «отложено» [6]. Новые планетарные модели показывают, что магнитное динамо на Ганимеди может функционировать за счёт непрерывного медленного формирования ядра, а не за счёт длительного охлаждения ядра посредством «железных осадков». Постепенный нагрев недр Ганимеда всё ещё может вызывать отделение и последующее оседание железа на ядре, «разбавляя» его содержимое и поддерживая магнитное поле [2]. Источниками тепла в таких моделях обычно

Дневник науки | [www.dnevniknauki.ru](http://www.dnevniknauki.ru) | СМИ Эл № ФС 77-68405 ISSN 2541-8327

служат радиоактивные изотопы, гравитационная энергия, высвобождаемая при образовании ядра, и приливный нагрев. Гипотеза основывается на предположении, что Ганимед имеет систему **Fe–FeS** с более низким диапазоном температур плавления по сравнению с другими сплавами на основе железа. Если ядро Ганимеда действительно состоит из субэвтектической смеси **Fe–FeS**, то постепенный нагрев мантии может приводить к вытеснению плотного расплава железа в растущее «протоядро» и изменению однородности жидкого металла, поддерживая работу динамо-механизма на протяжении многих миллиардов лет.

Следует также отметить, что на другом спутнике Юпитера, Каллисто, долгое время сохранялись неблагоприятные условия для существования аналогичного динамо-центра. Каллисто, вероятно, развивался по противоположному, более «холодному» сценарию. Классическая загадка при сравнении Ганимеда и Каллисто заключается в их сопоставимых размерах, объёмной плотности и близких орбитах [5]. Часто предполагается, что «родственник» Ганимеда частично состоит из льда и горных пород, однако негидростатические эффекты могли привести к завышению предполагаемого момента инерции (**МОИ**), оставляя открытой возможность наличия металлического ядра.

Таким образом, углубление понимания процесса формирования ядра Ганимеда может в дальнейшем оказать неоценимую помощь исследователям в изучении эволюции магнитного поля у других спутников Солнечной системы. По мнению учёных, эволюция ещё одного спутника Юпитера – Европы – могла протекать в более тёплых условиях, чем эволюция Ганимеда, вследствие чего формирование ядра в её недрах менее вероятно. Отсюда можно сделать вывод о том, от каких именно критериев зависят формирование ядра и потенциал возникновения магнитного поля у того или иного спутника, что, в свою очередь, позволяет науке оценить количество подобных Ганимеду спутников в галактике Млечный Путь и сопоставить пути эволюции этих далёких космических тел с телами Солнечной системы.

**Библиографический список**

- 1. Жарков В. Н., Гудкова Т. В., Шенберг Г.** Физика планетных недр. - М.: Наука, 2009. Гл. 5: Магнитные поля спутников Юпитера. С. 312–335.
- 2. Hauck S. A., Dombard A. J., Solomon S. C., Aurnou J. M.** Internal structure and dynamics of Ganymede: A model of the core and magnetic field generation // *Icarus*. 2006. Vol. 180, No. 2. P. 319-326. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2005.09.008>.
- 3. Hussmann H., Schubert G., Steinbrügge G., Sohl F., Kimura J.** Internal Structure of Ganymede. В книге: *Ganymede* / под ред. М. Volwerk. Cambridge: Cambridge University Press, 2025. С. 77-86. DOI: <https://doi.org/10.1017/9781108966474.007>.
- 4. Kivelson M. G., Khurana K. K., Volwerk M.** The permanent and inductive magnetic fields of Ganymede // *Geophysical Research Letters*. 2002. Vol. 29, No. 12. P. 54-1–54-4. DOI: <https://doi.org/10.1029/2002GL015228>.
- 5. Morard G., et al.** Phase diagram and thermo-elastic properties of Fe-S compounds up to 15 GPa: Thermodynamic constraints on the core of medium-sized telluric planets // *Earth and Planetary Science Letters*. 2024. Vol. 635. P. 118688. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2024.118688>.
- 6. Weiss B. P., Tikoo S. M.** The lunar dynamo: A review of the evidence and a new perspective on the evolution of the Moon's magnetic field // *Science*. 2014. Vol. 346, No. 6213. P. 1246753. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1246753>.