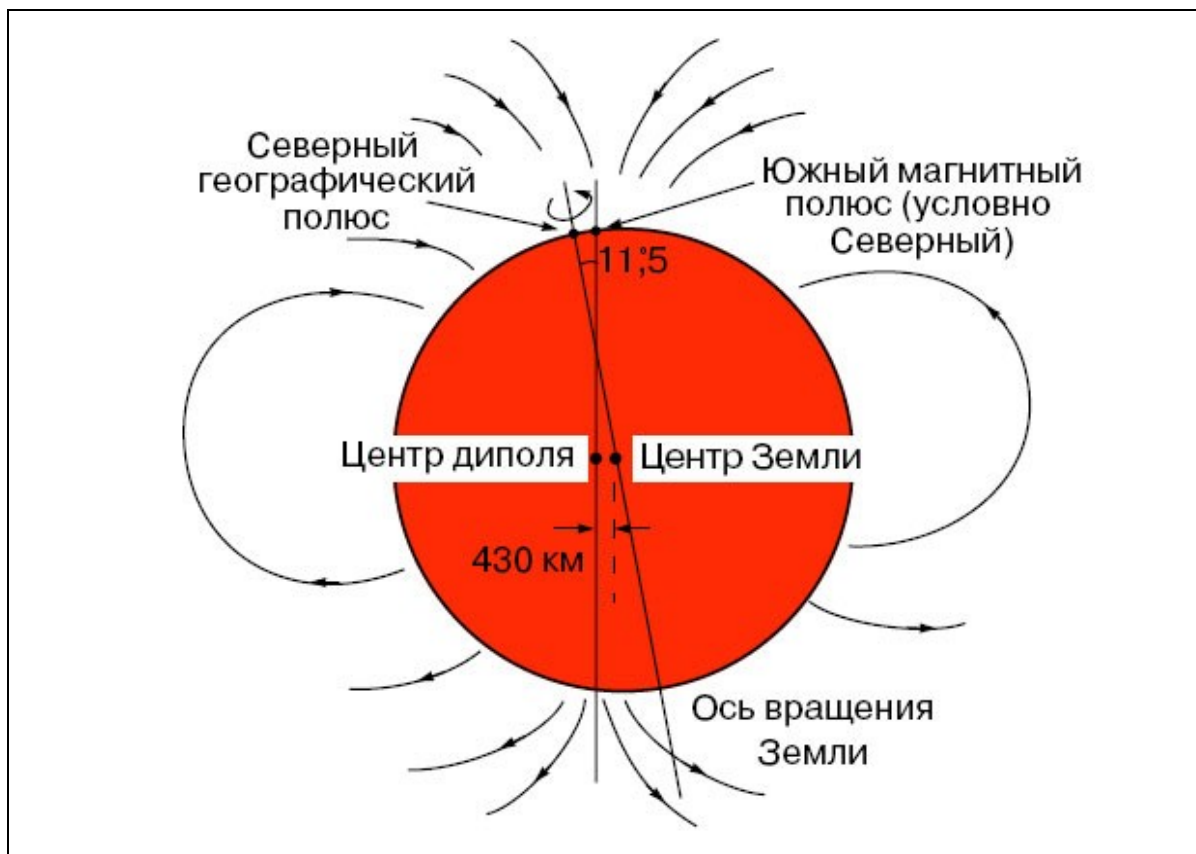


## Предложено простое объяснение инверсии магнитных полюсов Земли

14.05.09 | [Физика](#), [Науки о Земле](#), [Юрий Ерин](#)



**Рис. 1.** Схема магнитного поля Земли. Рис. из статьи Н. В. Короновского [«Магнитное поле геологического прошлого Земли»](#) в Соросовском образовательном журнале

На протяжении всей геологической истории Земли магнитные полюса нашей планеты неоднократно менялись местами. Такую смену полюсов называют геомагнитной инверсией. Исследователи из Франции предложили простую модель, которая объясняет данное явление. Согласно их теории, на дипольную компоненту геомагнитного поля, которая приводит к существованию двух полюсов, накладывается «шумящая» квадрупольная мода. Воздействие такого «шума» и приводит к инверсии магнитных полюсов.

Считается, что магнитное поле Земли существует уже более 3 млрд лет. Исследования истории геомагнитного поля показывают, что на протяжении всего времени своего существования это поле было непостоянным и хаотическим образом меняло полярность — северный магнитный полюс становился южным и наоборот. Такой процесс называют инверсией магнитных полюсов Земли. Согласно палеомагнитным данным, последняя инверсия магнитного поля произошла приблизительно 780 тыс. лет назад. Особенностью таких изменений полюсов является их высокая, по меркам геологической истории нашей планеты, скорость — смена полюсов происходит приблизительно за 10 тыс. лет. Источником палеомагнитных данных служат горные породы, которые

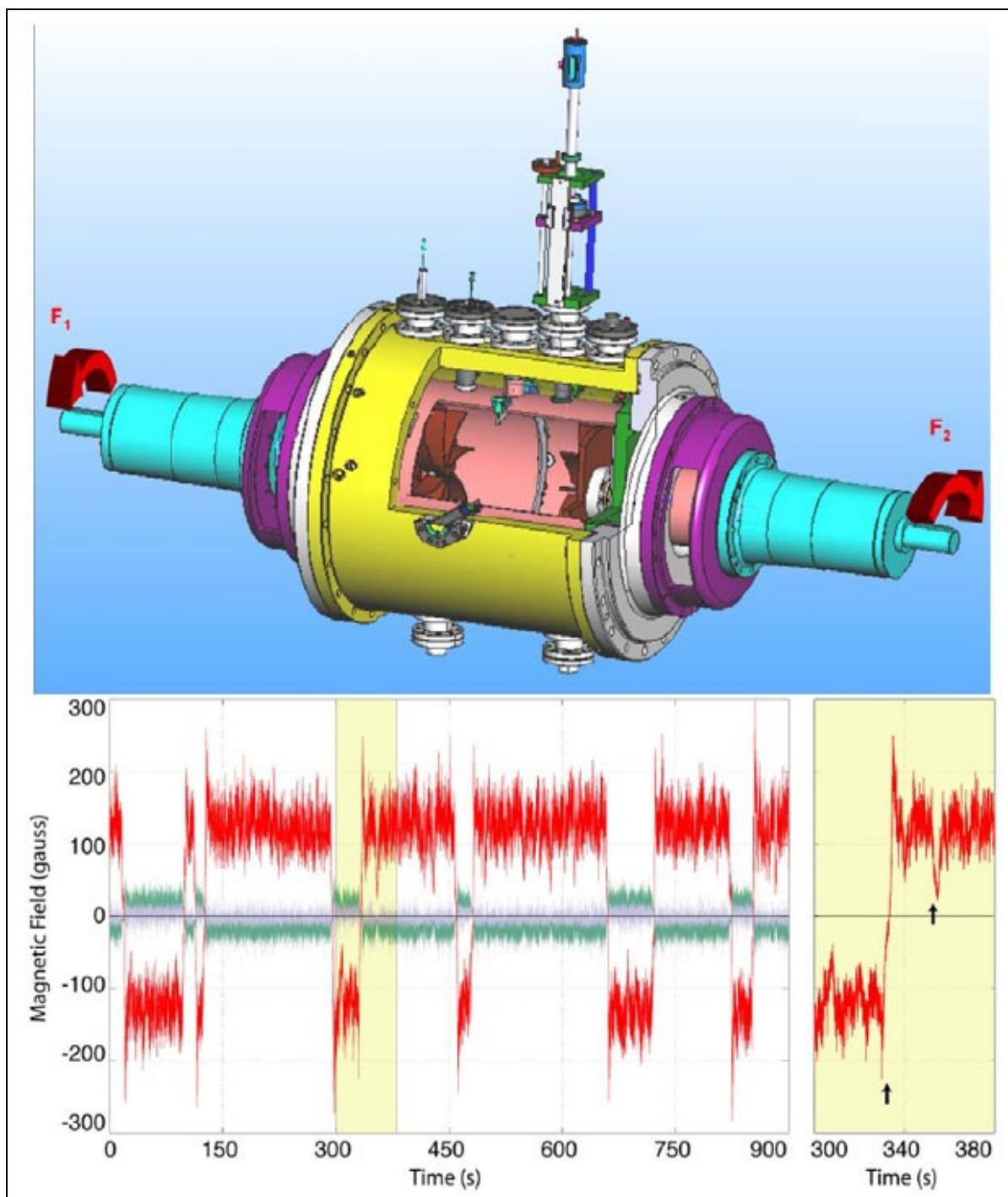
содержат в себе ферро- или ферритмагнитные компоненты. Дело в том, что в момент своего образования осадочная или магматическая порода приобретает намагниченность, направление и величина которой соответствует величине магнитного поля данной геологической эпохи. Иными словами, минерал как бы «замораживает» в себе геомагнитное поле в момент существования данной породы.

В настоящее время земное магнитное поле представляет собой магнитный диполь (см. рис. 1). Истинный южный магнитный полюс (отрицательный, где силовые линии магнитного поля «входят» в планету) расположен вблизи Северного географического полюса (в Канадском секторе Арктики), истинный северный магнитный полюс (положительный, где силовые линии «выходят» из Земли) сейчас находится недалеко от Южного географического полюса (в Индийском океане вблизи Антарктиды). Однако условно магнитные полюса Земли принято называть в соответствии с их географическим положением — южный магнитный полюс для удобства договорились считать северным, и наоборот. При этом ось магнитного диполя имеет наклон приблизительно в 11,5 градусов по отношению к земной оси вращения, а центр магнитного диполя смещен от центра Земли приблизительно на 430 км.

Магнитные полюса перемещаются по поверхности нашей планеты со скоростью до 40 км в год. Так, Северный магнитный полюс в 1900 году имел координаты 69° с. ш. и 97° з. д., а в 2005 году — 83° с. ш. и 118° з. д. То есть он двигался на север и запад, приближаясь к Северному географическому полюсу. А южный магнитный полюс за этот же период сместился из точки с координатами 72° ю. ш. и 148° в. д., в точку с координатами 64° ю. ш. и 138° в. д. Т.е. он перемещался на север и запад, удаляясь от южного географического полюса.

Наличие у Земли магнитного поля и его ярко выраженную дипольную структуру принято объяснять с помощью теории так называемого геодинамо. Считается, что главной причиной рождения магнитного поля является наличие у нашей планеты жидкого внешнего ядра (внутреннее ядро с глубины 5120 км и до центра Земли — твердое). Температура нижних слоев внешнего ядра выше, чем на его периферии, поэтому за счет тепловой конвекции происходит перемешивание жидких электропроводящих масс железа. Из-за вращения Земли скорость течения должна была бы во внешней части ядра быть больше, чем во внутренней. Однако поднимающаяся из глубины разогретая жидкость тормозит вращение внешних слоев внешнего ядра, а встречные, более холодные, нисходящие потоки, наоборот, ускоряют внутренние слои. Получается, что внутренняя часть внешнего ядра вращается быстрее внешней и играет роль своеобразного ротора (то есть вращающейся части) генератора, а внешняя — роль статора (неподвижной части). Отсюда и название модели — земное динамо, или геодинамо. Подобные течения порождают кольцеобразные электрические токи, которые производят суммарное магнитное поле дипольного характера.

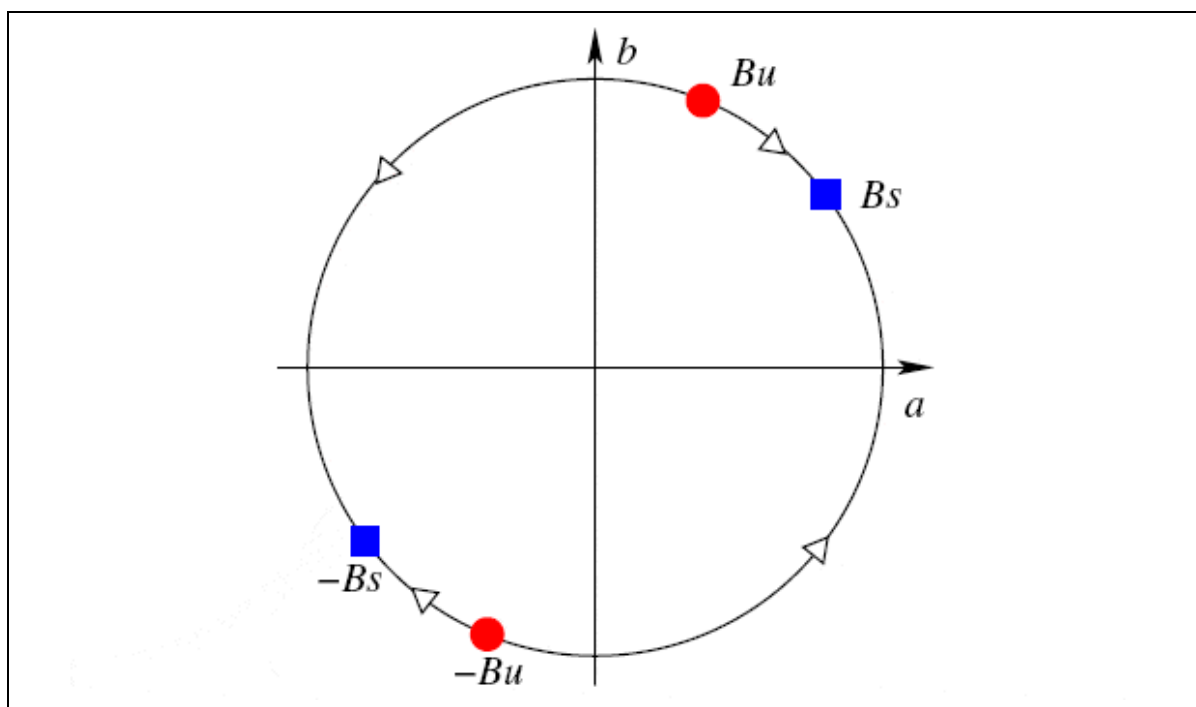
Чтобы подкрепить количественно гипотезу геодинамо, ученые не раз прибегали к численному анализу сложной системы [магнитогидродинамических уравнений](#), описывающую данную модель. Среди многообразия публикаций на эту тему здесь стоит упомянуть расчеты 3D-модели геодинамо, выполненные Гэри Глацмайером и Полом Робертсом. На суперкомпьютерах того времени (1995 год), работавших около 2000 часов, ученым удалось пронаблюдать рождение и эволюцию геомагнитного поля в течение «всего лишь» 40 тыс. лет. Тем не менее в результате решения трехмерных уравнений магнитной гидродинамики они получили не только дипольную структуру геомагнитного поля, но и «увидели» в конце расчетного интервала времени его инверсию. [Работа](#) Глацмайера и Робертса в том же году была опубликована в журнале *Nature* (в открытом доступе эту статью можно увидеть [здесь](#)).



**Рис. 2.** *Верхний рисунок:* лабораторное моделирование геодинамо — экспериментальная установка фон Кармана по генерированию магнитного поля во вращающемся жидком натрии. Размеры установки: внешний медный цилиндр имеет радиус 289 мм и длину 604 мм; внутренний медный — 206 мм и 524 мм с толщиной стенок 5 мм. Радиус железных пропеллеров 154,5 мм, расстояние между ними 371 мм. «Полезный» объем натрия равен 160 литрам. *Нижний рисунок:* временная зависимость напряженности магнитного поля в эксперименте фон Кармана. Изменение знака напряженности соответствует произошедшей инверсии полюсов. Рисунки из статьи M. Berhanu et al. Magnetic field reversals in an experimental turbulent dynamo в журнале EPL (*Europhysics Letters*)

Инверсию магнитного поля в модели геодинамо можно наблюдать и в лабораторных условиях. Среди таких опытов наиболее известен эксперимент [Теодора фон Кармана](#). Земное динамо воспроизводилось с помощью установки, изображенной на рис. 2 (описание установки приводится по статье M. Berhanu et al. [Magnetic field reversals in an experimental turbulent dynamo](#) в журнале *Europhysics Letters*).

В установке фон Кармана генерирование магнитного поля происходит в расплавленном электропроводящем натрии (температура плавления  $98^{\circ}\text{C}$ ), который заключен в двух концентрических медных цилиндрах. Движение жидкого натрия происходит во внутреннем цилиндре. Пространство между цилиндрами также заполнено расплавленным щелочным металлом, но находящимся в состоянии покоя. Два лопастных колеса присоединены к торцам внутреннего цилиндра и располагаются внутри него, заставляя натрий вращаться. Частота вращения пропеллеров  $F_1$  и  $F_2$  может меняться независимо друг от друга вплоть до 26 Гц. Как видно из описания, данная установка напоминает процессы, происходящие в недрах Земли: аналогом электропроводящей железной массы здесь является жидкий натрий, также проводящий ток; внутренний цилиндр соответствует внутренней области внешнего ядра; внешний цилиндр — периферии внешнего ядра. Специальными приборами фиксируется временная зависимость индукции рождающегося в таком эксперименте магнитного поля, обладающего приблизительно дипольной структурой. В эксперименте фон Кармана также наблюдалась инверсия рождающегося магнитного поля, выражающаяся в перемене знака его напряженности (нижняя часть рис. 2, красная кривая), что еще раз подтверждает правильность гипотезы геодинамо.



**Рис. 3.** Схематический рисунок, объясняющий инверсию магнитного поля Земли и его двоякое поведение в точке бифуркации  $\pm Bu$ . Под действием турбулентных флуктуаций земные магнитные полюса могут сместиться из устойчивых состояний  $\pm Bs$  в седловые, нестабильные точки  $\pm Bu$ . В этих точках возникает бифуркация поведения магнитных полюсов — они могут медленно вернуться в исходные состояния (экскурс) или быстро перейти в противоположные стабильные положения (инверсия). Рис. из обсуждаемой статьи в *Phys. Rev. Lett.*

В вышедшей недавно в журнале *Physical Review Letters* статье [Simple Mechanism for Reversals of Earth's Magnetic Field](#) французские ученые предложили **простую** теорию, основанную на модели геодинамо, которая объясняет инверсию магнитного поля Земли, не прибегая к численному анализу чрезвычайно сложных уравнений магнитной гидродинамики, как, например, в модели Глацмайера—Робертса.

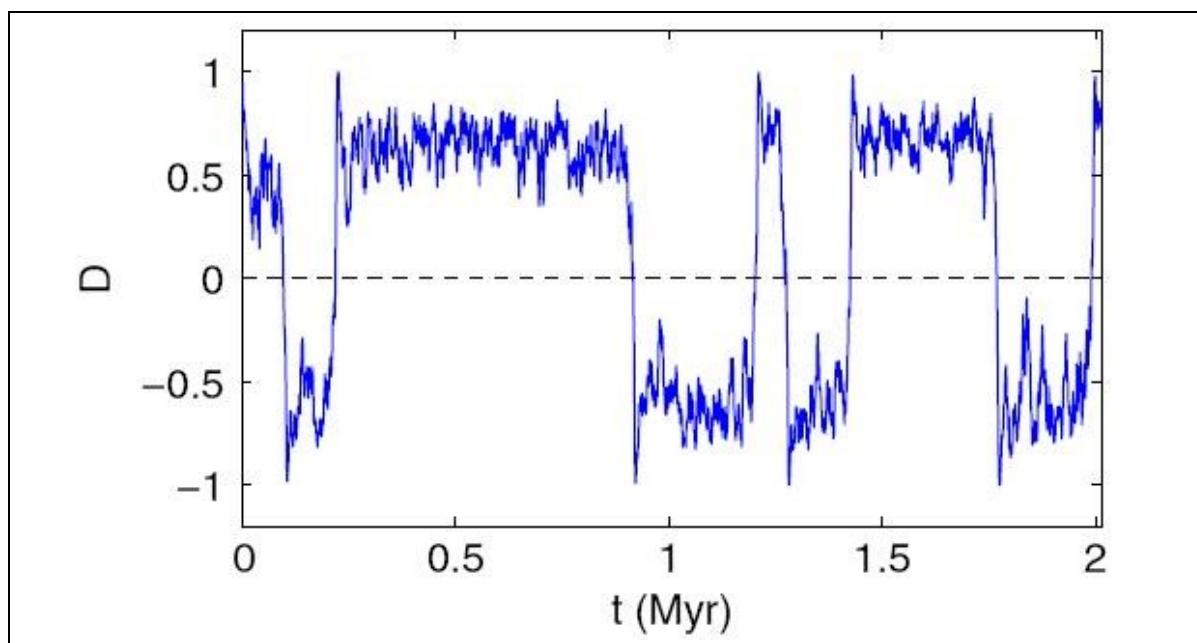
Вообще говоря, магнитное поле Земли можно представить как сумму стабильной дипольной и нестабильных квадрупольной, октупольной и т. д. компонент, или мод (см. [мультиполь](#)). Моды выше чем дипольная рождаются из турбулентных флуктуаций

течения электропроводящего железа внутри Земли. Авторы статьи в своей теории аппроксимируют геомагнитное поле суммой дипольной и квадрупольной мод, при этом последняя, согласно их модели, действует как белый шум на основную дипольную компоненту.

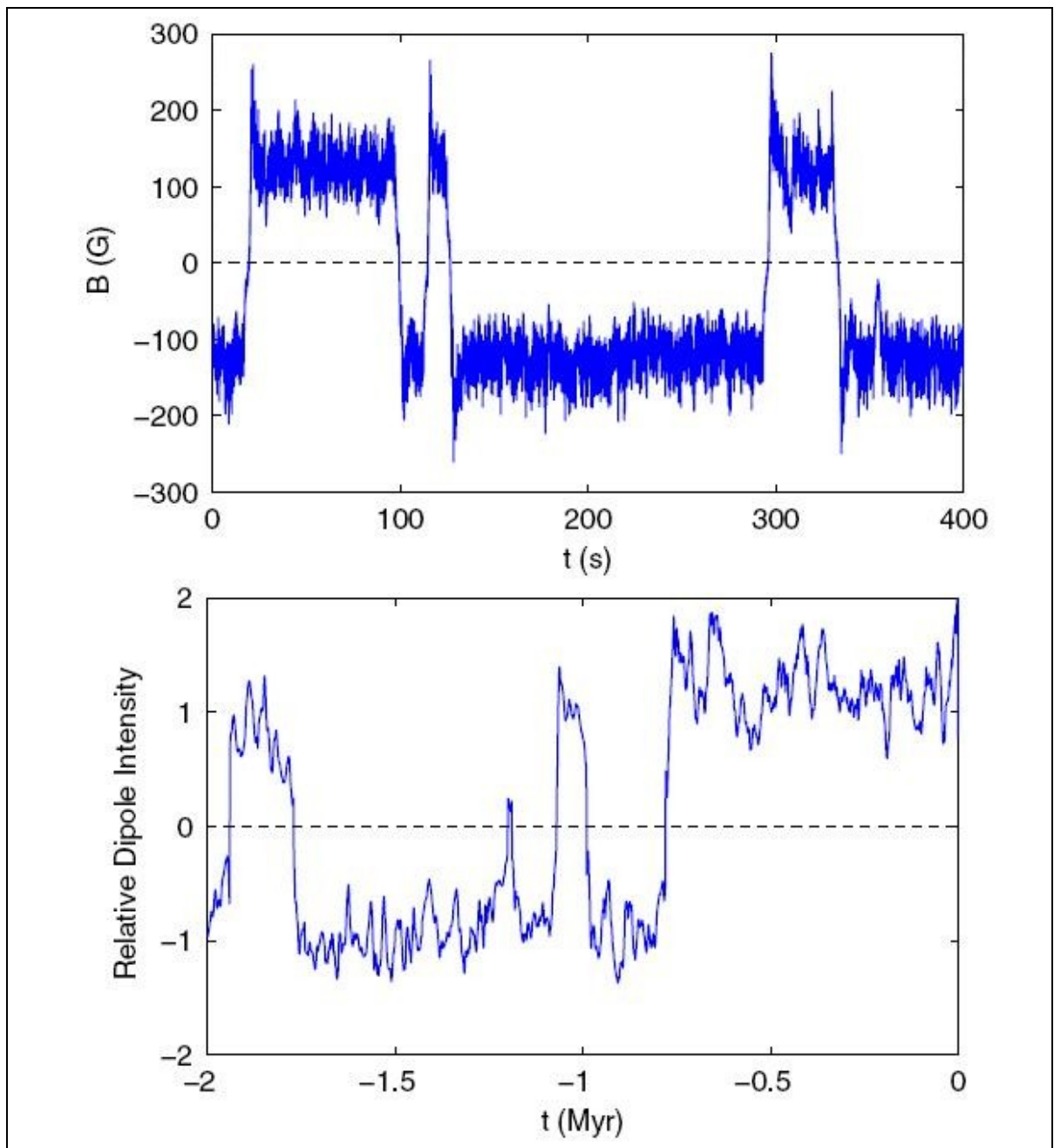
Благодаря такому шуму геомагнитные полюса отклоняются от своих устойчивых положений равновесия и переходят в так называемые седловые точки, или точки неустойчивого равновесия (см. рис. 3,  $\pm Bs$ ; здесь  $B$  обозначает индукцию магнитного поля,  $s$  — stable «устойчивый»,  $\pm Bu$ ,  $u$  — unstable «неустойчивый»). Далее ситуация может развиваться по двум сценариям (возникает бифуркация системы): полюса могут медленно вернуться в прежнее устойчивое положение — такая несостоявшаяся инверсия называется экскурсом, либо они начнут притягиваться и быстро двигаться к противоположным точкам равновесия — в этом случае происходит инверсия.

По сути, наблюдается бистабильная система, которая под действием шума хаотически может менять свое положение равновесия. Поскольку воздействие шумящей квадрупольной моды на дипольную является слабым, то вероятность смены полюсов низка. А значит, неудивительно, что в истории Земли были продолжительные периоды, называемые суперхронами, в течение которых не происходили инверсии магнитных полюсов.

Свои качественные рассуждения авторы теории подкрепляют количественными математическими расчетами. В их модели эволюция магнитного поля Земли описывается простым (в сравнении с магнитогидродинамическими уравнениями) уравнением, решая которое, ученые получают временную зависимость дипольного момента (по сути, напряженности) магнитного поля Земли (см. рис. 4, верхний график). На этой временной зависимости наблюдается большая скорость инверсии магнитного поля, непериодические колебания его напряженности, соответствующие экскурсам, и наличие суперхронов.







**Рис. 4.** Вверху — временная зависимость дипольного момента  $D$  магнитного поля в обсуждаемой теории французских ученых; отрицательное значение  $D$  соответствует смене полярности, то есть произошедшей инверсии; время измеряется в миллионах лет (Myr). В середине — зависимость индукции магнитного поля в эксперименте фон Кармана с частотами вращения пропеллеров  $F_1 = 22$  Гц и  $F_2 = 16$  Гц (см. пояснение выше) от времени, измеряемого в секундах. Внизу — зависимость относительного дипольного момента магнитного поля Земли от времени, основанная на палеомагнитных данных. Общими чертами данных графиков являются хаотические изменения индукции или дипольного момента магнитного поля, что соответствует экскурсам, продолжительные интервалы времени без инверсии — суперхроны и высокая скорость инверсии для выбранного временного масштаба. Рис. из обсуждаемой статьи в *Phys. Rev. Lett.*

Таким образом, в теории французских исследователей наблюдается и объясняется всё то, что присуще поведению магнитного поля в эксперименте фон Кармана (рис. 4, средний график) и, что самое главное, эволюции геомагнитного поля (рис. 4, нижний график).

**Источник:** François Pétrélis, Stéphan Fauve, Emmanuel Dormy, Jean-Pierre Valet. [Simple Mechanism for Reversals of Earth's Magnetic Field](#) // *Physical Review Letters* 102, 144503 (2009).